

Konrad Kudla

**Ermittlung einer Wöhlerkurve durch
experimentelle und theoretische Untersuchungen
für den Kerbfall:**

**„Mehrteilige, quer zur Krafrichtung durch
Stumpfnah verbundenen Bauteile“.
Am Beispiel „Lamellenstoß der Brücke Lochkov“**

-Diplomarbeit-

Hochschule Mittweida – University of Applied Science (FH)

Neumarkt, den 20.01.2010

Bibliographische Beschreibung:

Kudla, Konrad:

Ermittlung einer Wöhlerkurve durch experimentelle und theoretische Untersuchungen für den Kerbfall:

„Mehrteilige, quer zur Krafrichtung durch Stumpfnah verbundenen Bauteile“.
Am Beispiel „Lamellenstoß der Brücke Lochkov“

– 2009. – 227 S.

Roßwein, Hochschule Mittweida, Fachbereich Maschinenbau/
Feinwerktechnik, Diplomarbeit, 2009

Konrad Kudla

**Ermittlung einer Wöhlerkurve durch
experimentelle und theoretische Untersuchungen
für den Kerbfall:**

**„Mehrteilige, quer zur Krafrichtung durch
Stumpfnah verbundenen Bauteile“.**

Am Beispiel „Lamellenstoß der Brücke Lochkov“

- eingereicht als Diplomarbeit -

Hochschule Mittweida – University of Applied Science (FH)

Erstprüfer Zweitprüfer
Prof. Dr.-Ing. Peter Hübner Dr. sc. techn. Klaus Thiele

Neumarkt, den 20.01.2010

Vorwort und Danksagung

Die hier vorliegende Diplomarbeit entstand aus der Aufgabenstellung der Firma Max Bögl Stahl- und Anlagenbau GmbH & Co. KG, eine theoretische und praktische Untersuchung unter Ermüdungsbelastung am Schweißdetail „Lamellenstoß“ durchzuführen.

In dieser Arbeit sind die Grundlagen, die Durchführung und Ergebnisse der von mir selbst durchgeführten bzw. von mir geplanten Versuche die im Zusammenhang dieser Diplomarbeit durchgeführt wurden, anhand einer Vielzahl von Grafiken und Bildern dargestellt und beschrieben. Bei den Versuchen handelt es sich in erster Linie um Schwingversuche an einem Lamellenstoß. In diesem Zusammenhang danke ich für die Unterstützung bei den im Haus der Firma Max Bögl durchgeführten Versuchen besonders Herrn Dipl.-Ing (FH) Ralf Waidhauser und Herrn Dipl.-Ing Eric Lindner. Ebenfalls gilt mein Dank den Mitarbeitern der Firma Max Bögl, die mich bei und durch die Fertigung der Versuchskörper und der Versuchskörperaufnahme unterstützt haben.

Des Weiteren wurden im Zusammenhang dieser Arbeit von der Firma Max Bögl Versuche am Labor für Stahl- und Leichtbau beauftragt. Ich danke dem gesamten Team unter Leitung von Herrn Prof. Dipl.-Ing. Ö. Bucak für die erfolgreiche Zusammenarbeit und die Unterstützung, besonders sei an dieser Stelle Herr Dipl.-Ing (FH),SFI, M.Eng. Jan Lorenz erwähnt.

Aus dem ersten vor dieser Arbeit erstellten Musterstück I entstand nach umfangreichen Untersuchungen das Musterstück II. Ich danke für die Unterstützung bei der Analyse der Ergebnisse und der Erstellung eines weiteren Musterstückes den Herren Dipl.-Ing (FH),SFI Jens Winkler, Mathias Meincke und besonders Herrn Viktor Scheerman.

Für die Betretung dieser Diplomarbeit danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing P. Hübner sowie Herrn Dr.sc.techn. Klaus Thiele, die mich mit immer neuen Gedankenansätzen gefordert und motiviert haben.

Herrn Dipl.-Ing. O. Schreiber danke ich für die vielen Gespräche und den Gedankenaustausch über den Einsatz des Lamellenstoßes in den verschiedenen Brückentypen.

Vom Institut für Konstruktion und Entwurf der Universität Stuttgart danke ich Herrn Dipl.-Ing. Mathias Euler für die Diskussionen zur Auswertung der Schwingversuchsergebnisse und die Gespräche über den weiteren Forschungsbedarf.

Ich danke Herrn Dipl.-Ing. Mathias Albert für die Einsicht in das Archiv der Deutschen Bahn AG, sowie die Bereitstellung der Forschungsergebnisse aus den Schwingfestigkeitsversuchen zur Einordnung des Lamellenstoßes in die alte DS 804.

Ein ganz besonderer Dank gebührt meinen Eltern und Freunden, die durch ihre aufmunternden Worte eine große moralische Hilfe waren.

Konrad Kudla

Neumarkt, den 19.01.2010

Inhaltsverzeichnis

Vorwort und Danksagung	I
Inhaltsverzeichnis	I
1. Einleitung	1
1.1. Aufgabenstellung und Motivation	1
1.2. Abgrenzung	3
1.3. Vorgehensweise und Hintergründe zum Gang der Untersuchung in dieser Diplomarbeit	3
1.4. Zielsetzung	4
2. Allgemeine Grundlagen	5
2.1. Allgemeine Grundlagen zur Materialermüdung und zur Bemessung zyklisch beanspruchter Schweißverbindungen im Stahlbau	5
2.1. Grundlagen zur statistischen Auswertung von Schwingversuchen	12
2.1.1. Beispielrechnung aus dem Hintergrunddokument	16
3. Der Stumpfstoß in seiner Sonderform als Lamellenstoß im Brückenbau	20
3.1. Erläuterung der Materialverteilung im Brückenbau unter Betrachtung des Lamellenstoßes und der zulässigen Blechdicke	20
3.2. Ausführungsregelung für Lamellenstöße	23
3.3. Stand der Forschung und der zum heutigen Zeitpunkt bekannte Stand der Normung zum Kerbdetail Lamellenstoß	24
3.4. Der Einsatzbereich des Lamellenstoßes - erläutert an zwei Brückentypen	28
3.4.1. Betrachtung und Erläuterung des Lamellenstoßes in der Stabbogenbrücke Frankfurt Galluspark	28
3.4.2. Betrachtung der Verbundbrücke Lochkov unter dem Aspekt des Lamellenstoßes	31
4. Das Musterstück I „Lamellenstoß Brücke Lochkov“	35
4.1. Beschreibung des Schweißprozesses für das Musterstücke I	35
4.2. Mikroskopische Untersuchungen	39
4.3. Anfertigung der Makroschliffe	40
4.4. Durchführung und Dokumentation der mikroskopischen Betrachtung an den Kleinversuchskörper	41
4.5. Durchführung und Dokumentation der mikroskopischen Untersuchungen an den Großversuchskörpern	44
4.6. Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Betrachtung des Musterstückes II	46

5. Schweißversuch - Stirnfugennaht, Musterstück II	47
5.1. Beschreibung des Schweißprozesses „Musterstück Stirnfugennaht“	47
5.2. Berechnung und Messung der $t_{8/5}$ Zeiten	47
5.3. Auswertung und Ergebnisse der Härtemessungen	51
5.4. Mikroskopische Betrachtung	53
5.5. Fazit aus den Untersuchungen am Musterstück II	53
6. Schwingversuche Großversuchskörper	54
6.1. Versuchskörper	54
6.2. Versuchsaufbau	55
6.3. Versuchsergebnisse	55
7. Schwingversuche Kleinversuchskörper	66
7.1. Versuchsaufbau	66
7.2. Versuchskörper A, Kleinversuche	67
7.3. Versuchsaufbau A-1	67
7.4. Versuchsergebnisse Versuchsaufbau A-1	68
7.5. Versuchsaufbau A-2	71
7.6. Versuchsergebnisse A-2	72
7.7. Versuchsaufbau B	72
7.8. Versuchskörper B	73
7.9. Versuchsergebnisse, Versuchsaufbau B	74
8. Auswertung externe Ergebnisse	76
8.1. LBF Bericht 3205 (1974) [28]	76
8.1.1. Prüfkörperherstellung und Angaben zum Grundwerkstoff	76
8.1.2. Versuchsdurchführung und Versuchsergebnisse	77
8.2. LBF Bericht 4879 (1982) [44]	83
8.2.1. Auswertung der Versuchsergebnisse P. Berger [43]	84
8.2.2. Auswertung der Versuchsergebnisse LBF Bericht 4879 [42]	99
8.3. BAM Bericht 164	112
9. Zusammenfassung der Ergebnisse sowie ein Ausblick weiteren Forschungsbedarf	116
Literaturverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	XII

Verwendete Hilfsmittel.....	XIV
Erklärung	XIV
Anhang A. Materialkennwerte	XVII
Anhang B. Schweißanweisung Lamellenstoß	XVIII
Anhang C. Prüfbericht Nr.: 2009 – 2050	XIX
Anhang D. LBF Bericht Nr. 3205, Schwingfestigkeitsversuche für den Stumpfstoß in übereinanderliegender Gurtplatten	XXVI
Anhang E. LBF Bericht Nr. 4879, Schwingfestigkeitsversuche für den Stumpfstoß in drei übereinanderliegenden Gurtplatten.....	XLIII
Anhang F. Gutachterliche Stellungnahme der RWTH Aachen zur Kerbfalleinteilung und Prüfbarkeit von Lamellenstößen	LXXXV
Anhang G. Einfluss einzelner Aspekte auf Lebensdauer der Stahlbrückenkonstruktionen	LXXXIX

1. Einleitung

1.1. Aufgabenstellung und Motivation

Ermittlung einer Wöhlerkurve durch experimentelle und theoretische Untersuchungen für das Kerbdetail: „Mehrteilige, quer zur Krafrichtung durch Stumpfnah verbundenen Bauteile“. Am Beispiel „Lamellenstoß der Brücke Lochkov“

In den zugehörigen Ländern des CEN (Europäisches Komitee für Normung) soll bis Mai 2010 das Eurocode - Programm bauaufsichtlich eingeführt werden. In einigen Ländern wie z.B. Österreich ist diese bauaufsichtliche Einführung bereits erfolgt. Deutschland führt zum 31.05.2010 den Eurocode bauaufsichtlich, mit einer Übergangsfrist für die nationalen Normen von ca. drei Jahren ein. Aus 10 Paketen besteht das Eurocode Programm (siehe Abb. 1). Diese einzelnen Pakete bestehen wiederum aus mehreren Teilen. (siehe Abb. 2) Zu dem aus einzelnen Teilen bestehenden Eurocode Programm können die einzelnen Länder wiederum nationale Anhänge verfassen, die die nationalen Eigenheiten wie z.B. die Schneehöhen regeln. Als Beispiel seien die nationalen Anhänge zur DIN EN 1993-1-9 [1] sowie der Nationale Anhang als Entwurf zur DIN EN 1993-2 [2] erwähnt. Viele der nationalen Anhänge befinden sich zurzeit in der Erstellung und Bearbeitung oder liegen im Entwurf vor.

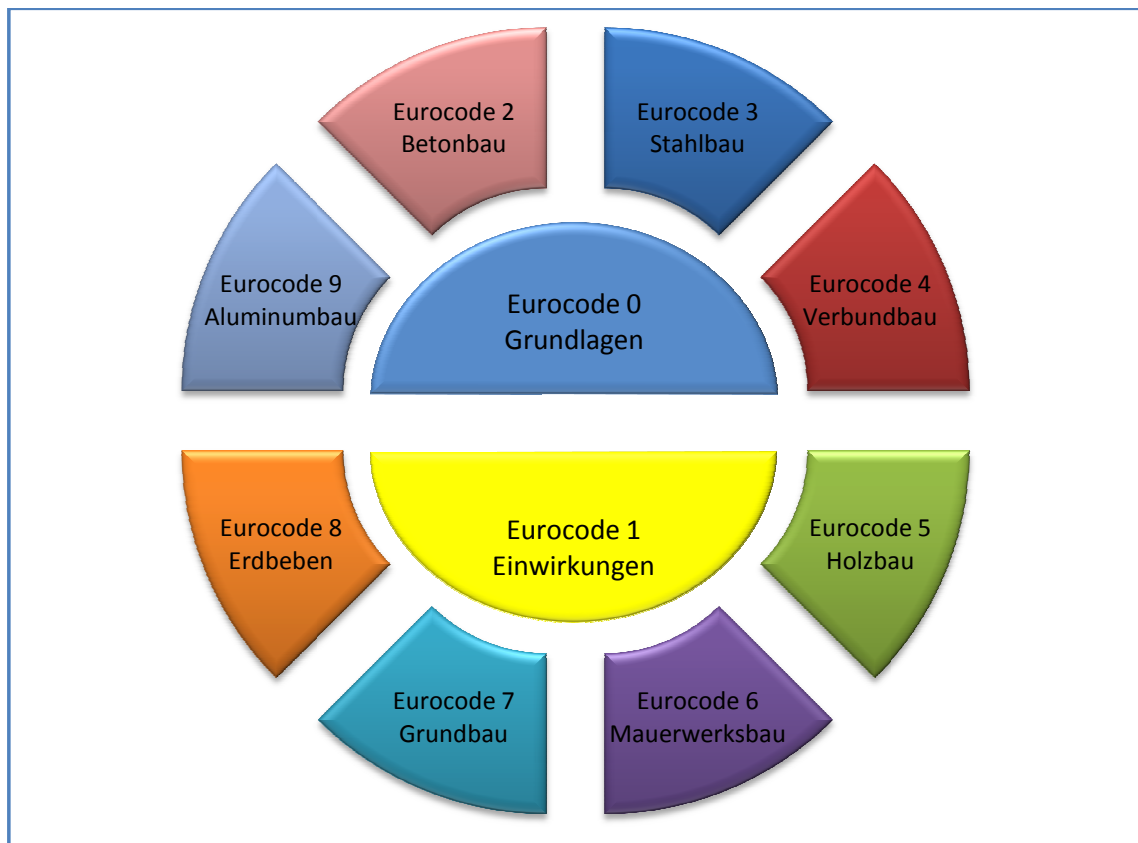


Abb. 1 Eurocode - Programm, Quelle: eigene Darstellung

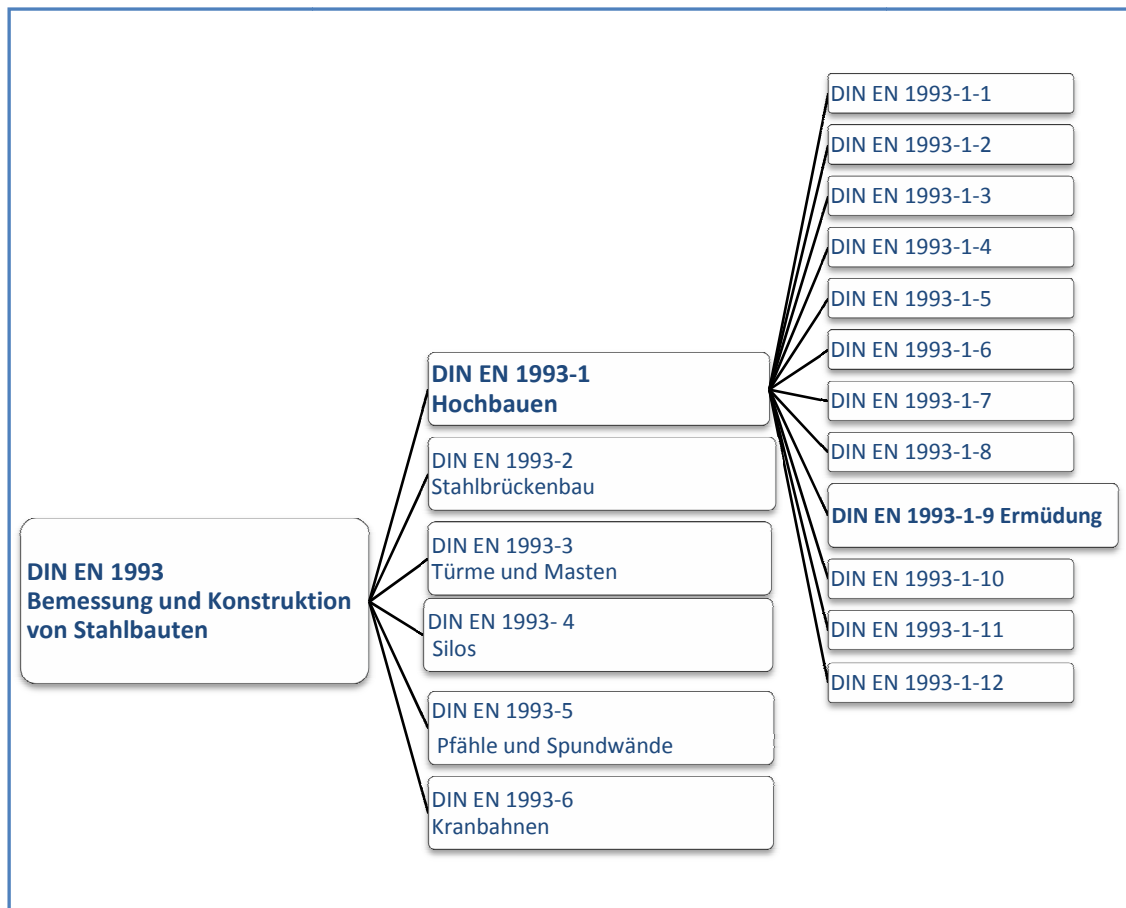


Abb. 2 Teile der DIN EN 1993, Quelle: eigene Darstellung

In der DIN EN 1993-1-9 [1] sind die Richtlinien zur Bemessung von Stahlbauten unter zyklischer Beanspruchung verfasst. In der Tabelle 8.1 dieser Bemessungsnorm sind die Kerbdetails für die Ermüdungsnachweise mit den zugehörigen Spannungsschwingbreiten aufgeführt. Bei der genaueren Betrachtung dieser Tabelle fällt auf, dass das Kerbdetail „Mehrteilige, quer zur Kraftrichtung durch Stumpfnah verbundenen Bauteile“ (im weiteren Verlauf dieses Dokumentes „Lamellenstoß“ genannt) nicht aufgeführt ist, obwohl einige andere nationale Bemessungsvorschriften dieses Kerbdetail beinhalten. Seit vielen Jahren ist der Lamellenstoß in Deutschland ein anerkanntes Schweißdetail und wird hauptsächlich im Brückenbau eingesetzt.

1.2. Abgrenzung

In der vorliegenden Diplomarbeit wird eine Wöhlerkurve für den Kerbfall „Lamellenstoß der Brücke Lochkov“ ermittelt. Die Ermittlung der Wöhlerkurve erfolgt aus Ergebnissen, die in Ermüdungsversuchen an einem Lamellenstoß, der aus Blechpaketen der Stärken 100mm + 90mm und 100mm + 80mm bestand, durchgeführt wurden. An dieser Stelle wird nur der zweiteilige Lamellenstoß untersucht.

1.3. Vorgehensweise und Hintergründe zum Gang der Untersuchung in dieser Diplomarbeit

- Betrachtung des Stumpfstoßes in seiner Sonderform als Lamellenstoß (Abs. 3)

In dieser Betrachtung soll herausgestellt werden, warum und wozu im Stahlbau der Lamellenstoß benötigt wird. Desweiteren sollen der aktuelle Stand der Regelwerke und die daraus entstehenden Möglichkeiten und ebenso die Probleme aufgezeigt werden. Desweiteren werden die Spannungsverläufe und Spannungsschwingbreiten an zwei Brückentypen betrachtet. Es handelt sich dabei um eine Stabbogenbrücke als Eisenbahnbrücke und um eine Verbundbrücke als einteiliger - Autobahnquerschnitt. Ziel dieser Betrachtung ist, einen Eindruck von der Anwendung des Lamellenstoßes im Brückenbau zu vermitteln.

- Beschreibung der Herstellung des Musterstückes I „Lamellenstoß Brücke Lochkov“ (Abs. 4)

In diesem Abschnitt wird die Herstellung des Musterstückes I beschrieben. Dieses Musterstück I war Grundlage für alle folgenden Untersuchungen zum Kerbdetail Lamellenstoß. Da sich der Lamellenstoß im wesentlichen durch die Stirnfugennaht vom regulären Stumpfstoß unterscheidet, lag der Fokus der ersten Untersuchungen auf dieser Naht. Um im Vorfeld der Untersuchung eine Aussage über das Anrissverhalten am Wurzelpunkt der Stirnfugennaht treffen zu können, waren dies die ersten durchgeführten Untersuchungen. Aus diesen Untersuchungen ergab sich eine neue Problemstellung. Aus dieser entstand die Überlegung, ein Musterstück II zu fertigen, welches nur die schweißtechnischen Eigenschaften der Stirnfugennaht abbildet.

- Beschreibung des Musterstückes II (Abs.5)

Da aus den vorhergehenden Untersuchungen im Bereich der Stirnfugennaht am Musterstück I Anrisse hervorgingen und der Anrisszeitpunkt nicht ermittelt werden konnte, wurde die Überlegung umgesetzt, ein Musterstück II zu schweißen. Hier wurde allerdings nur die Stirnfugennaht geschweißt. Im Vorfeld der Herstellung des Musterstückes II bestand auf Grund der aus den Untersuchungen am Musterstück I die Vermutung, dass die Anrisse an der Stirnfugennaht bereits während des Schweißens dieser entstanden sind. Es stand also die Klärung dieses Zustandes an.

Drei Maßnahmen wurden vom Verfasser festgelegt:

- Messung der $t_8/5$ Zeit während des Schweißens

- Makroschliffe nach dem Schweißen der Stirnfugennaht und mikroskopische Betrachtung
- Messung der Härtewerte im Bereich der WEZ

Durch diese Maßnahme konnte der Anrisszeitpunkt festgestellt werden und die Anrissursache soweit wie möglich eingegrenzt werden.

- Großschwingversuche Musterstück I

Zur Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit des Lamellenstoßes, der in der Brücke Lochkov verbaut wurde, wurden Schwingversuche an diesem durchgeführt und die Ergebnisse nach dem in der DIN EN 1993-1-9 [3] zu Grunde gelegten Verfahren ausgewertet. Ziel dieser Versuche war, eine Wöhlerlinie für den „Lamellenstoß Brücke Lochkov“ herzuleiten. Bei diesen Versuchen konnte durch die Stirnfugennaht kein Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit festgestellt werden. Um den Einfluss der Stirnfugennaht auf die Ermüdungsfestigkeit zu ermitteln wurde ein weiteres Schwingversuchsprogramm angedacht.

- Kleinschwingversuche Musterstück II

Ziel der Versuchsserie „Kleinversuchskörper“ war, ein Ergebnis zu ermitteln, welches den Einfluss der Stirnfugennaht auf die Ermüdungsfestigkeit darstellt. Um dies zu erzielen, wurden die Versuche an Versuchskörpern aus dem Musterstück I durchgeführt. Die Probekörper wurden so durch spannabhebende Verfahren vorbereitet, dass die Stirnfugennaht den größten Kerbeinfluss darstellt.

- Aufbereitung und Auswertung der externen Ergebnisse

Im Laufe der beiden Versuchsserien ist es gelungen, Einblick in die Versuchsergebnisse aus Forschungsvorhaben der Deutschen Bundesbahn zu erhalten. Durch eine Auswertung mit den statistischen Methoden, die der DIN EN 1993-1-9 [3] als Grundlage dienen, sollen diese Ergebnisse neu aufbereitet und ausgewertet werden.

1.4. Zielsetzung

Der Kerbfall „Lamellenstoß der Brücke Lochkov“ soll in seiner Ausführung bestätigt werden. In dieser Arbeit sollen Untersuchungen zur Ermüdungsfestigkeit am Lamellenstoß der Brücke Lochkov unter dem Aspekt der Ermüdungsfestigkeit durchgeführt werden. Dieses Ergebnis soll so aufbereitet werden, dass eine Bemessung des Lamellenstoßes nach DIN EN 1993-1-9 [3] für die Brücke Lochkov ermöglicht werden kann. Bereits erzielte Ergebnisse sollen ausfindig gemacht werden und nach den Vorgaben der DIN EN 1993-1-9 [3] neu ausgewertet werden. Desweiteren soll durch diese Arbeit eine Grundlage geschaffen werden, die eine Einordnung des Lamellenstoßes in die Kerbfalltabellen der DIN EN 1993-1-9 ermöglicht. Durch die Bereitstellung aller vorhandenen Ergebnisse soll der weitere Forschungsbedarf ermöglicht und aufgezeigt werden.

2. Allgemeine Grundlagen

2.1. Allgemeine Grundlagen zur Materialermüdung und zur Bemessung zyklisch beanspruchter Schweißverbindungen im Stahlbau

„Die Widerstandsfähigkeit von Werkstoffen und Bauteilen gegenüber häufig wiederholten oder schwingenden Belastungen ist meist erheblich niedriger als gegenüber einmaliger (statischer) Belastung“ [4]

Dieses Phänomen wird als Ermüdungsfestigkeit bezeichnet, als gleichwertiger Begriff wird hierfür auch „Schwingfestigkeit“ verwendet. Erklären lässt sich die verringerte Festigkeit unter zyklischer Belastung mit einem Blick auf den strukturellen Aufbau metallischer Werkstoffe. Daraus ableitend ergeben sich mikroskopische und makroskopische Verformungs- und Versagensvorgänge, die im einzelnen außerordentlich komplex sind.

Eine stark vereinfachte Betrachtungsweise der Vorgänge ist im Stahlbauhandbuch [4] wiedergeben und folgt der Darstellung von Macherauch und Mayer [5].

Zusammenfassend lässt sich dieser vereinfachte Vorgang in mehrere Stufen unterteilen:

- 1) unter Zug – Druck – Wechselbeanspruchungen bilden sich Mikrorisse aus
- 2) Ist die Wechselbeanspruchung ausreichend hoch, wachsen diese Mikrorisse rechtwinklig zur größten Normalspannung zu einem Makroriss und später zu einem technischen Anriss.

(Definition eines technischen Anrisses: 1mm Oberflächenlänge)

- 3) weiteres Risswachstum führt zur Schwächung des Querschnittes und beim Erreichen des kritischen Bereiches zum Restbruch

Dieser Prozess wird im Allgemeinen als Ermüdung bezeichnet und wird durch den Parameter Schwingbreite ($\Delta\sigma$) beschrieben. Die Schwingbreite berechnet sich aus dem oberen (σ_o) und unteren (σ_u) Beanspruchungswert. Gleichwertig zur Schwingbreite ist die Amplitude, die der halben Schwingbreite entspricht.

$$\Delta\sigma = 2\sigma_a = \sigma_o - \sigma_u$$

(1)

In Abb. 3 sind die möglichen Belastungen eines Schwingspiels dargestellt und darauffolgend die Gesetzmäßigkeiten in diesem Vorgang. Ebenfalls von Bedeutung ist die Beanspruchung, die sich aus dem Spannungsverhältnis bzw. der Mittelspannung bildet. Eine Druckmittelspannung erhöht die ertragbare Schwingspielzahl, wohingegen eine Zugmittelspannung die Schwingspielzahl bis zum definierten Versagen vermindert. Dies steht im direkten Zusammenhang zu der Tatsache, dass in der Druckphase der Riss geschlossen wird und in der Zugphase ein Öffnen des Risses erfolgt.

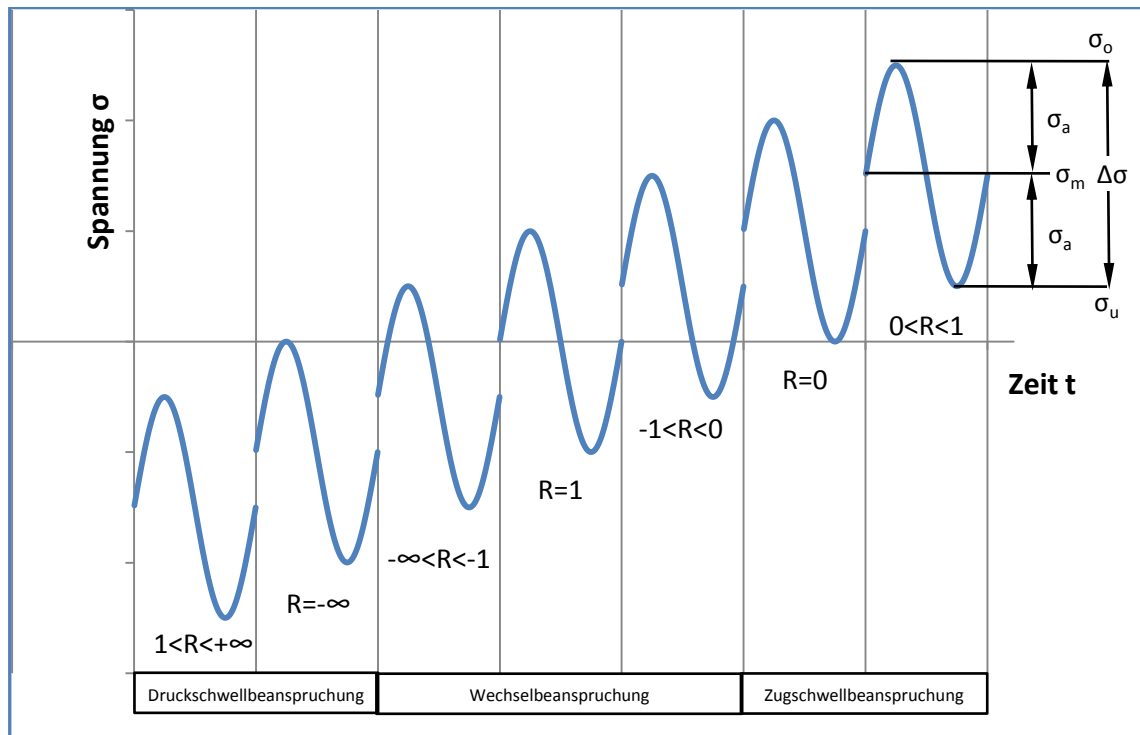


Abb. 3 mögliche Belastungsverläufe; Quelle: [6]

Oberspannung

$$\sigma_o = \sigma_m + \sigma_a \quad (2)$$

Unterspannung

$$\sigma_u = \sigma_m - \sigma_a \quad (3)$$

Spannungsamplitude

$$\sigma_a = \frac{(\sigma_o - \sigma_u)}{2} \quad (4)$$

$$\sigma_a = \sigma_o * \frac{(1 - R)}{2} \quad (5)$$

Spannungsverhältnis

$$R = \frac{\sigma_u}{\sigma_o} \quad (6)$$

Mittelspannung

$$\sigma_m = \frac{(\sigma_o + \sigma_u)}{2} \quad (7)$$

$$\sigma_m = \sigma_o * \frac{(1 + R)}{2} \quad (8)$$

$$\sigma_m = \sigma_a * \frac{(1 + R)}{(1 - R)} \quad (9)$$

Die Anzahl der Lastwechsel beschreibt die Lebensdauer eines Bauteils oder Konstruktionsdetails. Diese hängt von einigen Einflussgrößen ab. Diese Einflussgrößen können in 4 Gruppen unterteilt werden [7]:

- Spannungsschwingbreite
- Grad der Kerbwirkung
- Werkstoffeigenschaft
- Umwelteinflüsse

Spannungsschwingbreite

Die Spannungsschwingbreite stellt den größten Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit dar. Durch eine hohe Oberspannung wird das Risswachstum stark beeinflusst. In den neueren Regelwerken wie z.B. der DIN EN 1993-1-9 [3] wird das Spannungsverhältnis- und dadurch der Mittelspannungseinfluss vernachlässigt. Dies wird da mit begründet, dass bei geschweißten Bauteilen infolge des Schweißens Zugeigenspannungen im Bauteile entstehen und diese sich mit den Spannungen im Druckbereich überlagern. (siehe Abb. 4)

„Dies führt dazu, dass bei geschweißten Bauteilen am Ort der Rissentstehung der gesamte Teil des Spannungswechsels im Zugbereich liegt und dadurch aufgebraachte Spannungswechsel im Druckbereich nahezu keine Einfluss auf die Lebensdauer haben.“ [7]

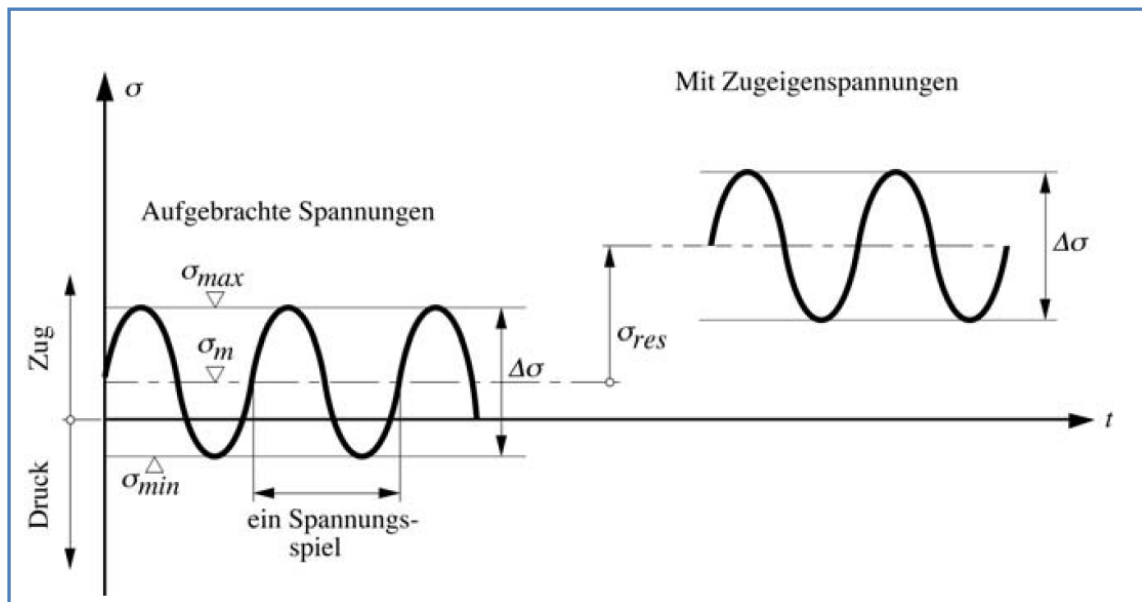


Abb. 4 Definition der Spannungen und Einfluss von Zugeigenspannungen; Quelle: [7]

Diese Zugeigenspannungen entstehen größtenteils aus Schrumpfungen, die beim Abkühlen des eingebrachten Schweißgutes im Schweißnahtbereich entstehen. Diesen Vorgang kann man sinnbildlich erklären: die Schweißnaht wird durch einen glühenden Stab ersetzt. Dieser Stab ist an den Flanken mit dem kalten Grundwerkstoff verbunden. Kühlt dieser Stab ab, wird sein Schrumpfen durch die Verbindung zum Grundwerkstoff behindert. Daraus folgend entstehen Spannungen im Grundwerkstoff und dem eingelegten Stab. Es ist zu beachten, dass das Schrumpfen in alle drei Richtungen behindert wird. Bei einer Mehrlagenschweißung wird beim Schweißen jeder Lage an der vorher eingebrachten Lage eine Wärmebehandlung durchgeführt, und die entstandenen Eigenspannungen bauen sich wie beim Spannungsarmglühen teilweise wieder ab. [8]

Grad der Kerbwirkung

„Kerben jeglicher Art (Querschnittssprünge, Lochschwächung, Werkstofffehler, Schweißnähte) führen zu einer Störung des Kraftflusses innerhalb des Bauteils und verursachen dadurch starke örtliche Spannungsspitzen und bewirken mehrachsige Spannungszustände. Die Geometrie des Konstruktionsdetails ist daher entscheidend für den Entstehungsort und das Wachstum von Ermüdungsrissen.“ [7]

Schweißnahtimperfectionen die infolge des Schweißens entstehen, haben ebenfalls einen erheblichen Einfluss auf die Kerbwirkung. Schweißnahtimperfectionen können z.B. sein:

Risse, Bindefehler, ungenügende Durchschweißung, Einbrandkerben, Wurzelfehler, Kantenversatz etc.

Auf die Punkte Werkstoffeigenschaften und Umwelteinflüsse wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen; sie können beispielsweise in folgender Literatur nachgelesen werden [9] [7] [10].

Einteilung der Nachweiskonzepte

In dem Regelwerk für zyklisch beanspruchte Stahlbauten DIN EN 1993-1-9 [3] sind zwei Nachweiskonzepte zur Bemessung aufgeführt:

- 1) Nennspannungskonzept
- 2) Strukturspannungskonzept

Neben diesen Konzepten existieren noch einige andere, an dieser Stelle seien beispielhaft das Kerbspannungskonzept und die bruchmechanischen Konzepte erwähnt. Diese Konzepte sind in der Literatur zu finden. Beispielhaft seien genannt [11] [12] [13] [14] [15].

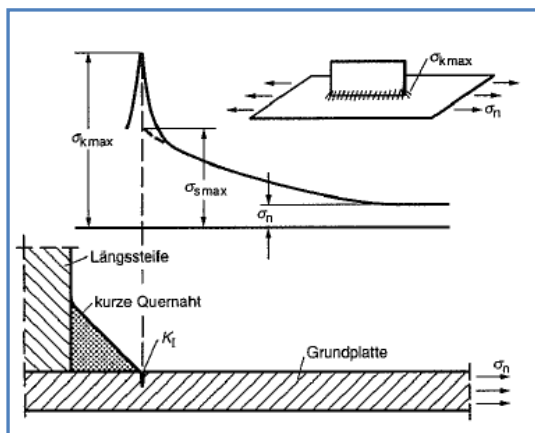


Abb. 5 Spannungsverlauf an einer Kehlnaht; Quelle: [10]

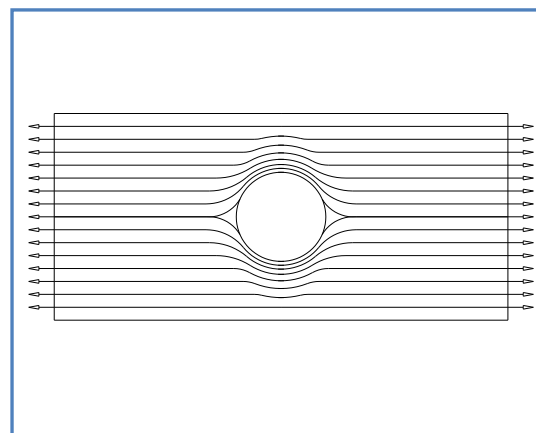


Abb. 6 gestörter Spannungsverlauf; Quelle eigene Darstellung

Abb. 5 verdeutlicht die einzelnen Ansätze der Nenn-, Struktur- und Kerbspannungskonzepte. Betrachtet man ein tragendes Blech, auf dem eine Steife durch nicht tragende Schweißnähte aufgeschweißt ist, so ergibt sich ein gestörter Spannungsverlauf im tragenden Bauteil. Durch die Veränderung des Spannungsverlaufes kommt es auf Grund der Querschnittsänderung zu einer Spannungserhöhung im Bereich der Störstelle.

Beim Nennspannungskonzept werden die Schnittgrößen und Spannungen (Abb. 5 σ_n) nach der klassischen Mechanik errechnet -ohne Berücksichtigung der lokalen Spannungskonzentration- [15] Imperfektionen und Eigenspannungen werden auf der Seite der Beanspruchung nicht mit erfasst. Der geometrische Einfluss der Kerbe/Schweißnaht sowie die Einflüsse aus Imperfektion und Eigenspannungen werden auf der Seite der Beanspruchbarkeit berücksichtigt. Diese Beanspruchbarkeit wird durch Versuche für die einzelnen Kerbdetails ermittelt. Der Versuchsaufbau zur Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit einzelner Kerbdetails oder ganzer Bauteile erfolgt nach dem Wöhlerversuch. August Wöhler (1819-1914) hat diese Versuche entwickelt, um die Ursache von Achsbrüchen zu ermitteln. [16] Mehrere möglichst gleiche Bauteile werden im einfachsten Fall einer sinusförmigen Belastung solange ausgesetzt, bis sie entweder einen definierten Anriss aufweisen oder zu Bruch gehen. Diese Ergebnisse werden in einem Wöhlerliniendiagramm dargestellt. Als Darstellung hat sich die doppelt-logarithmische Skalierung bewährt. Auf der Abszisse wird die Anzahl der Spannungswechsel N und auf der Ordinate die Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ abgetragen. Der sich ergebende Mittelwert wird durch eine Ausgleichsgrade beschrieben, die als Ermüdungsfestigkeitskurve oder Wöhlerkurve bezeichnet wird. Im internationalen Raum wird diese Kurve als S-N Kurve bezeichnet.

Die Steigung m der Ermüdungsfestigkeitskurve für die Längsspannungsschwingbreite ist in der DIN EN 1993-1-9 [3] auf $m=3$ festgelegt (siehe Abb. 7). Hingegen fällt die Steigung der Ermüdungsfestigkeitskurve für Schubspannungsschwingbreiten flacher aus; sie ist auf $m=5$ festgelegt. Eine Einordnung des Kerbfalles $\Delta\sigma_c$ erfolgt bei $N=2 \times 10^6$ Schwingspielen. Bei $N=5 \times 10^6$ Schwingspielen ändert sich die Steigung auf $m=5$ bis zum Abknickpunkt $N=8 \times 10^6$ Schwingspielen. Ab dort verläuft die Kurve waagrecht und wechselt in die Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_L$.

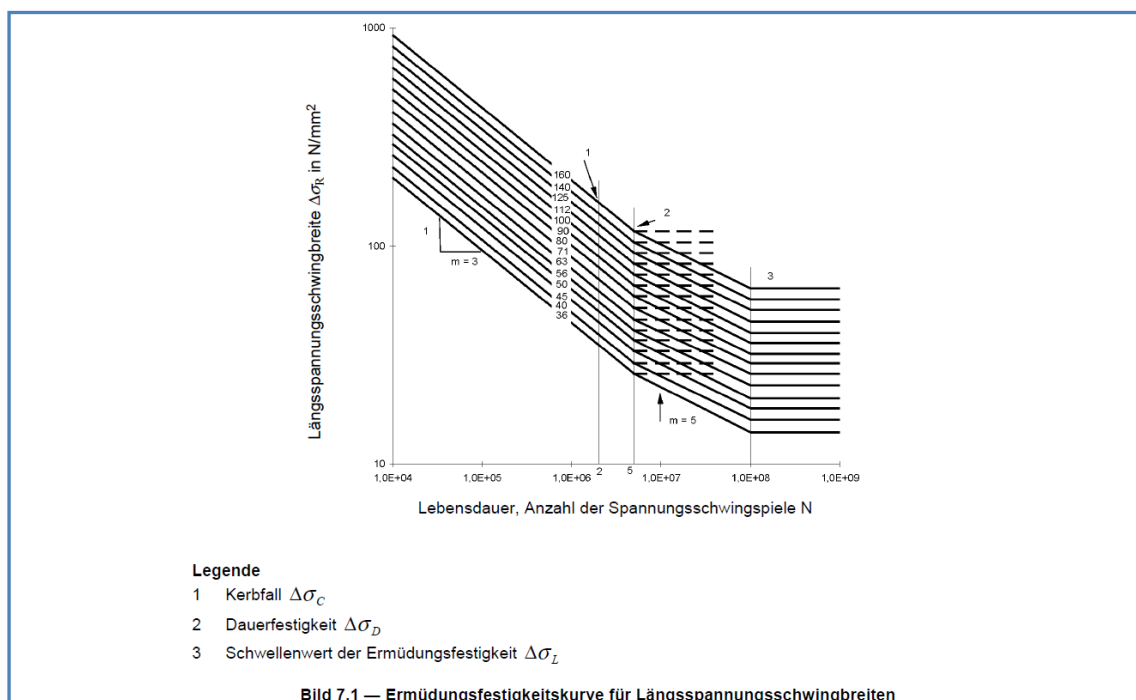


Abb. 7 Bild 7.1 aus der DIN EN 1993-1-9

Für die Vielzahl der Stoß- und Nahtarten sowie die Nachbehandlungsmöglichkeiten ergibt sich eine große Anzahl von Beanspruchbarkeiten. Diese sind in den Kerbfallkatalogen der Literatur und Fachnormen wiederzufinden (z.B. [3] [17] [18]) Diese Kerbfallkataloge sind immer material- und in der Regel auch schweißverfahrensabhängig.

Bei der Erstellung von Wöhlerkurven ist die Qualität der Ergebnisse davon abhängig, wie genau das spätere Bauteil im Prüfaufbau abgebildet wird. Der Einfluss der Eigenspannungen sowie auch die Bauteilgröße haben einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse der Schwingversuche. Da auch bei scheinbar identischem Prüfkörper und konstanten Versuchsbedingungen die Lebensdauer stets einer Schwankung unterworfen ist, ist eine gewisse Anzahl von Prüfkörpern notwendig, um die Streuung der Versuche abzubilden. Bei der Auswertung und Festlegung von Ermüdungsfestigkeitskurven ist es somit notwendig, die Streuung durch statistische Methoden abzubilden. Es werden Werte zu Grunde gelegt, die bestimmte Überlebenswahrscheinlichkeiten darstellen und dem Sicherheitskonzept des Bemessungskonzeptes angepasst sind.

Im Konzept der Strukturspannung ist vorgesehen, die Spannungserhöhung durch alle konstruktiven Details zu ermitteln. Dies kann durch Extrapolation einer in einem bestimmten Abstand gemessenen Spannung erfolgen [9]. Diese Spannung (siehe Abb. 5 σ_{smax}) kann auch durch die eine Berechnung unter Berücksichtigung des Einflusses der Bauteilstruktur durch z.B. die Finite – Elemente - Methode errechnet werden. Näheres hierzu ist in der Literatur [9] [15] zu finden. Der Nachweis der Ermüdungsfestigkeit erfolgt durch den Vergleich der vorhandenen Strukturspannung zur Strukturspannungswöhlerlinie, die für die Nahtgeometrie und den Ort des Versagensanrisses unterschiedlich ausfällt. (siehe [3])

Im Stahlbau ist bisher weniger die Methode des Kerbspannungsnachweises verbreitet. Dieser sieht vor, die örtliche Spannungserhöhung z.B. durch eine Kerbe zu berücksichtigen (siehe Abb. 5, σ_{kmax}). Zur Abbildung der Geometrie eignen sich Makroschliffbilder, auf deren Grundlage ein FE-Modell aufgebaut wird und die Kerben mit z.B. einem Kerbradius von $r = 1\text{mm}$ ausgerundet werden. An diesem Modell wird die Kerbspannung ermittelt und mit einer Masterwöhlerlinie verglichen [15] [19].

2.2. Grundlagen zur statistischen Auswertung von Schwingversuchen

„Widersprüche in den Ergebnissen von Schwingfestigkeitsuntersuchungen lassen sich auf unterschiedliche Versuchs- und Auswertmethoden zurückführen. [...] Die Auswertung muss mathematisch begründet und so beschaffen sein, dass sie jederzeit rechnerisch nachvollziehbar ist.“ [20]

Wie im Abs. 2.1 beschrieben werden üblicherweise die Ergebnisse aus Schwingversuchen in einem doppelt-logarithmischen Diagramm dargestellt und durch eine Ausgleichsgerade abgebildet. Die Gerade wird in der Regel durch folgende Gleichung beschreiben [20]:

$$N = C * \Delta\sigma^m \quad (10)$$

Die Konstante C beschreibt die Art der Schweißverbindung sowie die enthaltene Anfangsfehlergröße. Die Steigung m kann als eine Werkstoffkonstante angesehen werden. Zur Auswertung der Versuchsergebnisse durch statistische Methoden stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung. Üblicherweise wird für die Auswertung von Wöhlerversuchen eine Regressionsanalyse bevorzugt. Durch die Versuche wird eine Sammlung von Daten ermittelt; die Lebensdauer N und die Schwingbreite $\Delta\sigma$. Eines der beiden Merkmale soll durch das andere Merkmal möglichst genau bestimmt werden. Bei einer Regression spricht man davon, dass y durch x beschrieben wird. Die Regression wird mit der Methode der kleinsten Quadrate durchgeführt. Abhängig von der Sichtweise, nach der ein Merkmal geschätzt werden soll, fällt die Regressionsgerade aus.

„Die Regression des Konstrukteurs verläuft etwas flacher als die des Werkstoffprüfers. Beide Geraden schneiden sich im Schwerpunkt der Punktwolke.“ [20]

Diese Feststellung ist in der Abb. 9 dargestellt. Es ist sowohl die Gerade des Werkstoffprüfers, der die Lebensdauer gegeben hat und daraus die Spannung schätzt möchte, als auch die Gerade des Konstrukteurs abgebildet, der die Lebensdauer kennt und daraus die Schwingspielzahl schätzen würde. Dies zeigt, dass eine genaue Festlegung des Auswertverfahrens von großer Bedeutung ist, da die Ergebnisse sehr unterschiedlich ausfallen können. Auf Grundlage dieser Erkenntnis schlägt A.Hobbacher in seinem Artikel zur Auswertung von Schwingversuchen [20] vor, zwischen diesen beiden Geraden eine Winkelhalbierende zu bilden (siehe Abb.9). Dieses Verfahren ist deckungsgleich mit dem Verfahren, welche in der Literatur als orthogonale Regression zu finden ist. [21] Dieses Verfahren beruht darauf, wie in Abb. 8 gezeigt, dass das kleinste Quadrat durch das Lot zur Regreissonsgersten gebildet wird. Allerdings sei an dieser Stelle erwähnt, dass auch Hobbacher selbst in seinem später erschienenen IIW Dokument zur Schwingfestigkeit [9] von diesem Verfahren Abstand nimmt. Im IIW Dokument [9] steht geschrieben:

„Die Berechnung erfolgt durch lineare Regression, wobei die Schwingbreite der Spannung [...] als unabhängige Variable betrachtet wird.“

Diese Auswertung entspricht auch dem Vorgehen der Auswertung von Schwingversuchsergebnissen, welche die Grundlage für die Kerbfalltabellen der DIN EN 1993-1-9 [3] abgebildet hat. Im Vorfeld dieser Europäischen Norm gab es eine Vornorm die DINV ENV 1993-1-1. Aus dieser Vornorm ist die DIN EN 1993-1-9 entstanden. Zu dieser Vornorm existiert ein Hintergrunddokument, in dem ist unter anderem die Auswertung der Versuchsergebnisse für die Vornorm festgelegt ist. Beim Vergleich der beiden Kerbfalltabellen sind keine Abweichungen zu erkennen, das heißt dieses Hintergrunddokument [22] hat auch heute noch Gültigkeit, und Versuchsergebnisse, die durch das Bemessungskonzept der DIN EN 1993-1-9 [3] angewendet werden, müssen nach diesen Vorgaben ausgewertet werden.

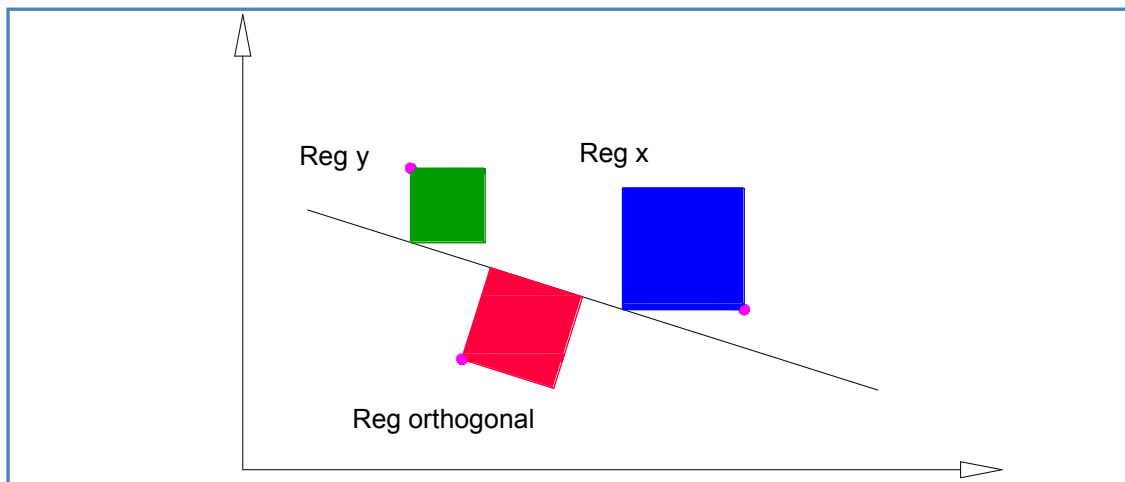


Abb. 8 Darstellung der linearen Regressionsmethoden; Quelle: eigene Darstellung

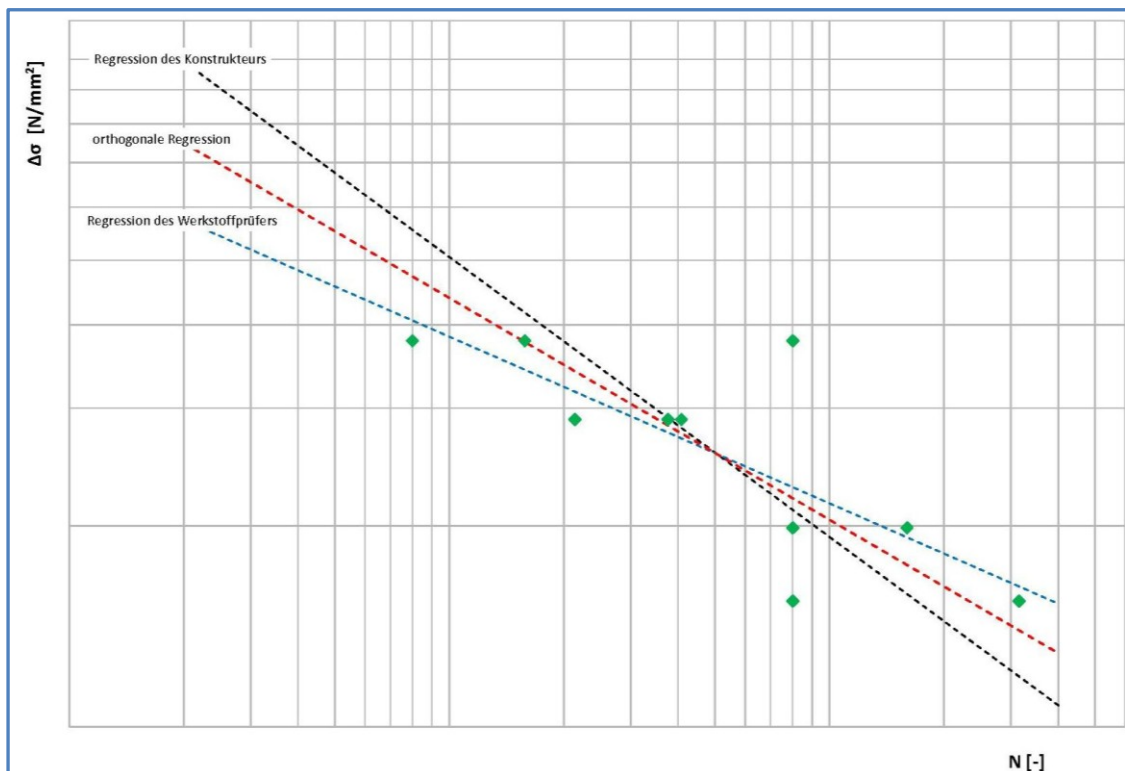


Abb. 9 Lage der Regressionsgeraden; Quelle: eigene Darstellung

Desweiteren ist die Lage der Regressionsgeraden auch von weiteren Faktoren, die durch die Versuchstechnik teilweise gesteuert werden können, abhängig.

„Die Regressionsgerade ist bei herkömmlicher Auswertung von der Streuung abhängig. [...] Große Streuungen und kleine Spannungsbereiche führen zu steilerer Wöhlerlinie.“ [20]

Betrachte man die Datensammlung von Versuchsergebnissen dann streuen in der Regel die Schwingspielzahlen auf einem Spannungsniveau. Erfahrungsgemäß ist es so, dass bei einer hohen Spannungsschwingbreite die Ergebnisse weniger streuen als bei niedrigen Spannungsschwingbreiten. [9] Diese Abhängigkeit ist in der Abb. 10 dargestellt und zeigt, dass die Auswahl der Spannungsschwingbreite einen Einfluss auf die Neigung der späteren Wöhlerkurve hat.

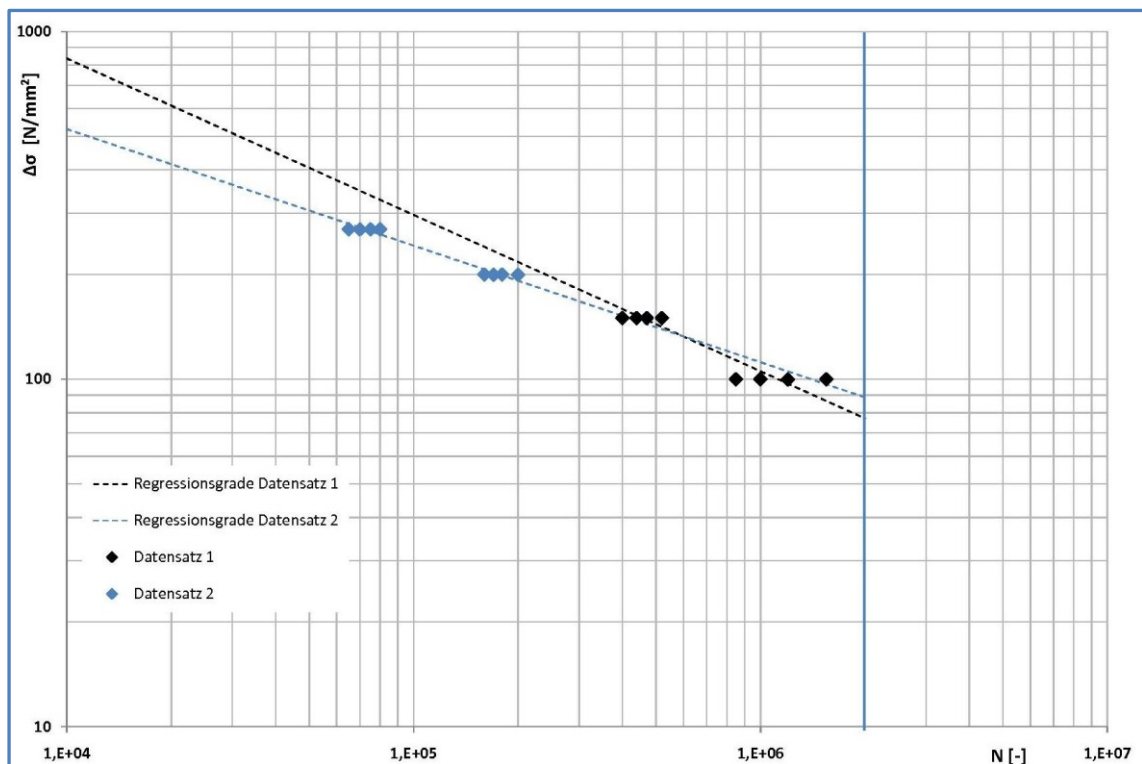


Abb. 10 Lage der Regressionsgeraden in Abhängigkeit der Versuchsspannungen; Quelle: eigenen Darstellung

Diese Streuung auf jedem Spannungsniveau unterliegt einer Verteilung z.B. t-verteilt oder Gauß-normalverteilt. Durch die Gerade wird der Mittelwert der Ergebnisse abgebildet. Die Unsicherheiten, die aus den Versuchsergebnissen unterhalb der Geraden resultiert, werden durch eine Verschiebung der Geraden abgefangen. Die Versuchsergebnisse und somit auch der Einhängpunkt der Geraden bei 2×10^6 Lastwechsel werden in charakteristische Werte überführt. Diese Werte werden bei einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 95% und zweiseitigem Vertrauensintervall von 75% ermittelt.

Im IIW Document XXII-1539-96/XV-845-96 [17] werden für die Berücksichtigung der statistischen Effekte die Faktoren k_i [$i = 1; 3$] vorgeschlagen. Die nachfolgende Erläuterung wurde aus diesem Dokument übernommen.

$$k_1 = \frac{t_{(0,875,n-1)}}{\sqrt{n}} + \Phi_{(0,95)}^{-1} * \sqrt{\frac{n-1}{\chi_{(0,125,n-1)}^2}} \quad (11)$$

t Wert der t -Verteilung, hier für eine einseitige Wahrscheinlichkeit von 0,875 oder eine zweiseitige Wahrscheinlichkeit von 0,75 bei $n-1$ Freiheitsgrade

n Anzahl der Prüfstücke

Φ Verteilfunktion der Gauß-Normalverteilung, hier 1,645 für eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 95% (die Hochzahl -1 gibt die inverse Funktion an)

χ Chi-Quadrat, hier für eine Wahrscheinlichkeit von 0,125 bei $n-1$ Freiheitsgraden

Die Chi-Quadrat-Korrektur deckt eine mögliche Abweichung der Versuchsdaten von der angenommenen Gauß-Normalverteilung ab. Wenn anhand anderer Versuchsdaten Informationen über die Verteilung vorliegen oder wenn eine große Zahl von Prüfstücken verfügbar ist, kann diese Korrektur entfallen:

$$k_{12} = \frac{t_{(0,875,n-1)}}{\sqrt{n}} + \Phi_{(0,95)}^{-1} \quad (12)$$

Bei einer größeren Anzahl von Prüfstücken kann die t -Verteilung durch die Gaußnormalverteilung ersetzt werden, woraus

$$k_1 = \frac{\Phi_{(0,875)}^{-1}}{\sqrt{n}} + \Phi_{(0,95)}^{-1} \quad (13)$$

Bei der Beurteilung der Ermüdungsfestigkeit von einem Schweißdetail durch mehrere Versuchsreihen sollten die Versuchsreihen einzeln ausgewertet und nachträglich durch das gewichtete Mittel zusammengefasst werden. [20] Auf eine weitere Korrektur der Ergebnisse wird im IIW Document XXII-1539-96/XV-845-96 [17] hingewiesen.

„Bei Wöhlerlinien sollte angemessen berücksichtigt werden, dass in kleinen Proben üblicherweise geringe Eigenspannungen vorhanden sind. Diese Ergebnisse sollten korrigiert werden, um größere Eigenspannungen im Bauteil und Tragwerk zu berücksichtigen. Dies kann entweder durch Versuche bei hohen R-Werten, z.B. $R=0,5$, oder durch Versuche bei $R=0$ und eine Abminderung der Dauerfestigkeit bei 2×10^6 um 20% geschehen.“ [9]

2.2.1. Beispielrechnung aus dem Hintergrunddokument

Im bereits genannten Hintergrunddokument zur DIN EN 1993-1-9 [22] ist eine Beispielrechnung wiedergegeben. Zur Veranschaulichung des Rechenalgorithmus wird diese Beispielrechnung an dieser Stelle in einer vereinfachten Form dargestellt.

In Tab. 1 sind die Versuchsdaten aus dem Beispiel wiedergegeben. Diese Daten werden im doppeltlogarithmischen Netz dargestellt. Auf der X-Achse wird die Schwingspielzahl N und auf der Y-Achse die Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ abgetragen. Die Regressionsanalyse wird an den logarithmierten Werten von x_i und y_i vorgenommen.

Tab. 1 Datenpool; Quelle: [22]

Nr.	$\Delta\sigma_i$	N_i	$x_i = \log \Delta\sigma_i$	$y_i = \log N_i$	x_i^2	y_i^2	$x_i y_i$
1	108	1.077.000	2,03	6,032	4,135	36,388	12,266
2	108	800.000	2,03	5,903	4,135	34,846	12,003
3	139	597.000	2,14	5,776	4,593	33,362	12,378
4	139	537.000	2,14	5,730	4,593	32,833	12,279
5	202	204.000	2,31	5,310	4,593	28,192	12,241
6	202	188.000	2,31	5,274	5,315	27,817	12,159
7	202	107.000	2,31	5,029	5,315	25,295	11,594
8	265	79.000	2,42	4,898	5,872	23,987	11,868
9	265	70.000	2,42	4,845	5,872	23,475	11,741
10	265	42.000	2,42	4,623	5,872	21,374	11,203
Σ			22,5387	53,4204	51,0149	287,568	119,733

Der Regressionskoeffizient stellt die Steigung m der Ausgleichsgeraden dar.

$$b = \frac{n * \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n * \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} = -3,148 \text{ (Regressionskoeffizient)}$$

(14)

$$a = \frac{1}{n} \left(\sum y_i - b \sum x_i \right) = 12,436 \text{ (Achsenabschnitt)}$$

(15)

Das Konfidenzintervall wird bestimmt durch:

$$\log \Delta \sigma = \frac{\log N - a}{b} = 1,948$$

(16)

$$\Delta \sigma = 88,716 \text{ (50\% Überlebenswahrscheinlichkeit)}$$

Die Varianzen der Stichprobe berechnen sich aus:

$$S_{xx} = \sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n} = 0,216$$

(17)

$$S_{yy} = \sum y_i^2 - \frac{(\sum y_i)^2}{n} = 2,194$$

(18)

$$S_{xy} = \sum x_i y_i - \frac{\sum x_i \sum y_i}{n} = -0,670$$

(19)

Die Standardabweichung wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$s^2 = \frac{S_{yy} - b * S_{xy}}{n - 2} = 0,0147$$

(20)

$$s = 0,121$$

Entscheidend für die Bemessung ist die Kurve mit einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 95%. An dieser Stelle wird von einer t-Verteilung ausgegangen und aus dieser ergibt sich für $t_{\alpha,FG}=1,850$ bei 8 Freiheitsgraden. Aus diesem kritischen Bereich für die einseitige Fragestellung wird die Funktion f berechnet.

$$a = n - 2 = 8 \text{ (Freiheitsgrade)} \quad (21)$$

$$f = 1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_c - \bar{x})^2}{S_{xx}} = 1,534 \quad (22)$$

$$t(\alpha)' * s\sqrt{f} = 0,235 \quad (23)$$

Die Spannungsschwingbreite wird nach folgender Gleichung mit 95% Überlebenswahrscheinlichkeit bei $2 \cdot 10^6$ Spannungsspielen berechnet.

$$\log \Delta \sigma_c = \frac{\log 2 \cdot 10^6 - (\alpha - 0,235)}{b} = 1,874 \quad (24)$$

$$\Delta \sigma_c = 71,50 \text{ N/mm}^2$$

Anhand der Abknickpunkte für die Gerade bei $2 \cdot 10^6$ Spannungsspielen ergibt sich die Bemessungskurve. Sämtliche Versuchsergebnisse dieser Arbeit wurden mit dem Excel-Tool KK-Reg. ausgewertet. Dieses Tool wurde vom Verfasser in Anlehnung an das Hintergrunddokument zur DIN En 1993-1-9 [22] erstellt. Die Beispielrechnung ist in einem doppeltlogarithmischen Netz in Abb. 11 dargestellt.

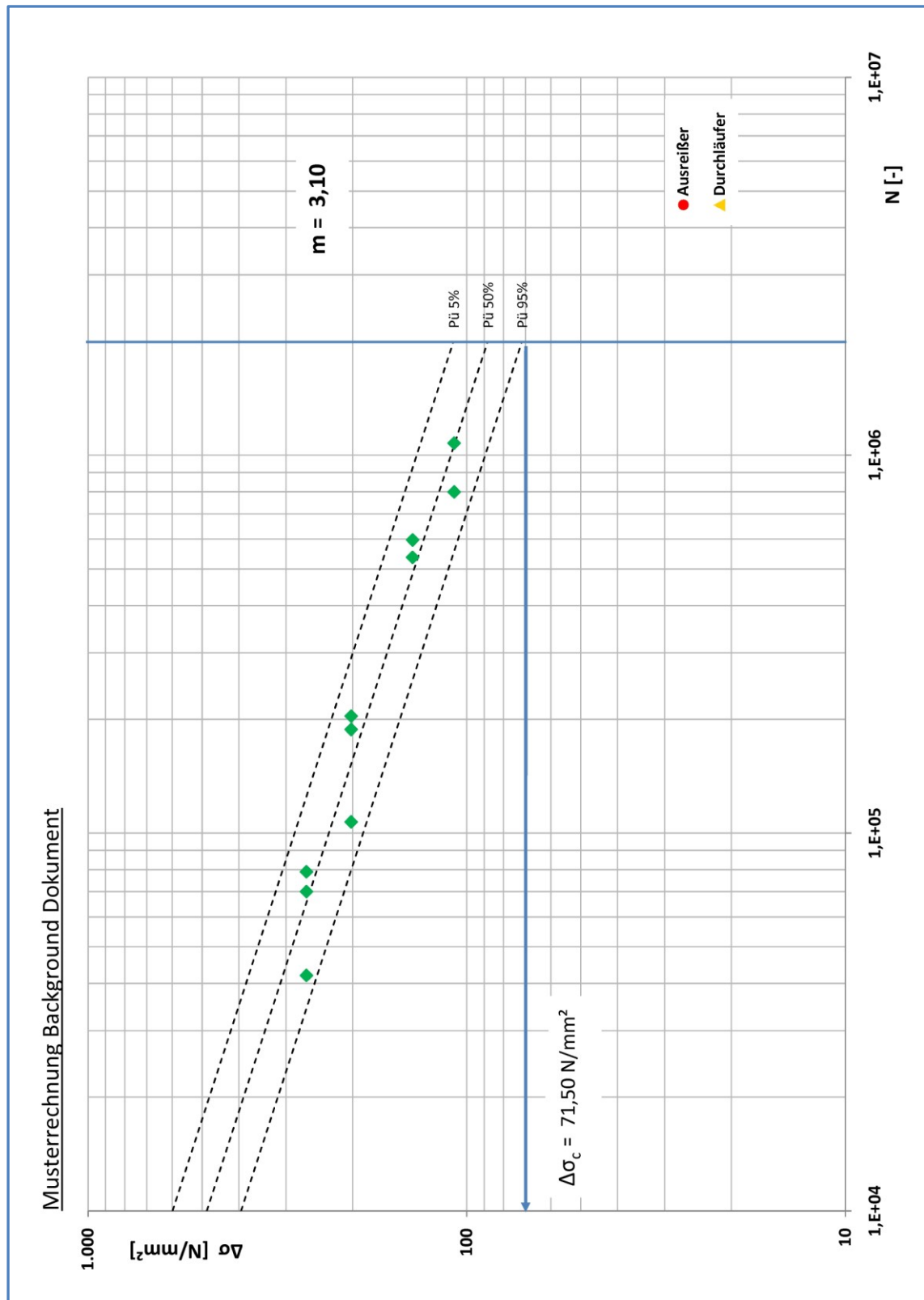


Abb. 11 Ergebnisse Beispielrechnung; Quelle: eigene Darstellung

3. Der Stumpfstoß in seiner Sonderform als Lamellenstoß im Brückenbau

3.1. Erläuterung der Materialverteilung im Brückenbau unter Betrachtung des Lamellenstoßes und der zulässigen Blechdicke

Der Stahlbrücken- und auch der Verbundbrückenbau sind durch die Verwendung von geschweißten Profilen geprägt. Die Blechdicken bei geschweißten Profilen werden von sehr vielen Einflussfaktoren bestimmt. An dieser Stelle seien einige -aber bei weitem nicht alle- genannt.

- mittragende Breite
- Neigung zum Beulen
- Schweißseignung
- statischer Anforderungen an die Festigkeit

Desweiteren ist der Brückenbau von sehr langen bzw. auch sehr schweren Bauteilen geprägt. Das führt dazu, dass die Bauteile auf Grund der Transportmöglichkeiten erst auf der Baustelle zu einem Bauwerk zusammengeschweißt werden. All diese Einflussfaktoren müssen mit den verfügbaren Blechlängen und Blechdicken sowie den Fertigungsmöglichkeiten des Stahlbaubetriebes in Einklang gebracht werden. Geschweißte Profile bringen gegenüber gewalzten Profilen den Vorteil, dass der Materialeinsatz sehr gut den statischen Anforderungen angepasst werden kann. Aus den fertigungsbedingten Schweißstößen in Längs- und Querrichtung ergibt sich die Möglichkeit, verschiedene Dicken sowie Materialgüten und Materialbreiten zu kombinieren. Dem Konstrukteur ergeben sich dadurch sehr viele Freiheiten, die aber durch wirtschaftliche Faktoren eingeschränkt werden. Ein sehr großer wirtschaftlicher Faktor ist neben der eingesetzten Materialmasse auch der Faktor der Fertigungskosten. Diese setzen sich zu einem großem Teil aus der Fertigungszeit für die Schweißarbeit sowie die damit verbundenen Schweißnahtvorbereitung zusammen. Abhängig von diesen Kosten ist z.B., ob es sinnvoll ist, ein langes Blech mit einer konstanten Dicke einzusetzen oder ein langes Blech aus mehreren kurzen Blechen mit unterschiedlicher Materialstärke zusammenzuschweißen. Diese Kostenbetrachtung ist von den Fertigungslöhnen und den Materialkosten abhängig und muss individuell für jedes Bauteil und jeden Fertigungsbetrieb betrachtet werden.

Im Brückenbau ist es üblich, mit sogenannten Materialverteilungsplänen zu arbeiten. Diese Materialverteilungspläne werden idealerweise in Zusammenarbeit zwischen dem Statiker und dem Konstrukteur der ausführenden Firma erstellt. Diese Materialverteilung kann mit der Bewehrungsdeckungsline, die bekanntermaßen im Stahlbetonbau eingesetzt wird, verglichen werden. Im Materialverteilungsplan werden abhängig vom Spannungsverlauf im Bauwerk die Blechstärken festgelegt. Die Blechstöße werden nach den Schusslängen und den verfügbaren Blechlängen verteilt. Die Bemühungen gehen dahin, die benötigten Montagestöße mit den Bedarfstößen zu einem Stoß zu-

sammenzulegen. In diesen Stößen ob Montage oder Bedarfsstoß werden die Belchdickensprünge nach denen für das Bauwerk geltenden Regelwerken ausgeführt.

Die Blechdicken unterliegen auf Grund der Gegebenheiten beim Walzen in den Regelwerken einer Blechdickenbeschränkung. In den Bemessungsregeln des Eurocodes regelt dies die DIN EN 1993-1-10 [23]. Diese ist inhaltlich mit der DAST-Ri 009 [24] äquivalent. Diese Regelwerke begrenzen die Blechdicke nach oben abhängig vom eingesetzten Werkstoff und der Einsatztemperatur. Dies geschieht zur Vermeidung von Sprödb Brüchen. Die in der DIN EN 1993-2/Na enthaltene Tabelle zur Dickenbegrenzung ist in Tab. 2 wiedergegeben.

Tab. 2 Dickenbegrenzung von Stahlteilen für Straßenbrücken; Quelle: E DIN EN 1993-2/NA:2009-09

Für Flachblech und Langprodukte nach DIN EN 10025-2, DIN EN 10025-3, DIN EN 10025-4, DIN EN 10025-5, DIN EN 10025-6					
Stahlgüte nach DIN EN				Druckbereich	Zugbereich 2)
10025-2	10025-3 und -4 1)	10025-5	10025-6	mm	
S235JR	S275N/M S275NL/ML <				

Im Großbrückenbau sind die Dickenbegrenzungen für Bleche im Zugbereich schnell erreicht. Dem Verfasser sind zwei Möglichkeiten bekannt, wie man benötigte Blechdicken über den in Tab. 2 zulässigen Dicken einsetzen kann.

- Zulassung im Einzelfall für Bleche mit Sondergüten
- Aufschweißen von Lamellen

In dieser Arbeit wird nur das Aufschweißen von Lamellen betrachtet. Zur Erhöhung der Materialstärke werden ein oder mehrere Bleche übereinander gelegt und durch Halsnähte miteinander verbunden. In der Praxis hat es sich bewährt, die aufgelegte Lamelle schmäler als das eigentliche Grundblech auszubilden. Die Halsnähte können durch diese Maßnahme als einfache Kehlnähte ausgebildet werden, und eine arbeitsaufwendige Schweißnahtvorbereitung entfällt. Durch den Verbund entstehen Schubkräfte. Diese werden vollständig durch die Halsnaht abgetragen. Die Stirnflächen werden durch versenkte Kehlnähte miteinander verbunden. Diese Schweißnaht wird als Stirnfugennaht bezeichnet. (siehe Abb. 12)

Werden zwei dieser Blechpakete in einem Stumpfstoß gestoßen, entsteht der hier untersuchte Lamellenstoß. In einem Stumpfstoß werden vier Bleche gestoßen. Dieser Stumpfstoß unterscheidet sich vom klassischen Stumpfstoß durch die innenliegende Stirnfugennaht und wird nur auf der Baustelle benötigt. In der Werkstatt würde man vorm Verbinden der Bleche zum Paket die einzelnen Bleche miteinander verschweißen.

In der Praxis hat sich gezeigt, dass es oftmals unter Betrachtung der wirtschaftlichen Gesichtspunkte sinnvoller ist, ein relativ dickes Grundblech zu wählen und dieses durch abgestufte Bleche abhängig vom Kräfteverlauf durch Lamellen zu verstärken. Daraus ergeben sich auf der Baustelle auf Grund der eingeschränkten Bauteillängen die beschriebenen Lamellenstöße.

3.2. Ausführungsregelung für Lamellenstöße

Die Ausführung von Lamellenstößen ist in der Richtlinie der Deutschen Bahn ausführlich geregelt. Diese Ausführung hat sich in der Praxis sehr bewährt. Die RIL 804 gibt für die Ausführung von Lamellenstößen folgende Vorgaben:

- Aufeinanderliegende Gurtplatten dürfen nicht an gleicher Stelle gemeinsam gestoßen werden, ausgenommen bei Baustellenstößen.
- Baustellenstöße sind nach Abb. 12 auszuführen. Bei der Herstellung dieser Stöße müssen die Stirnfugennähte erhalten bleiben.
- Die maximale Gesamtdicke darf nur 150mm betragen, wobei bei der Dicke der einzelnen Gurtplatten auf $t \leq 100\text{mm}$ zu begrenzen ist.
- Lamellenpakete mit 2 und 3 Gurtplatten, die dicker als 150mm ausgeführt werden, dürfen nur mit Genehmigung verwendet werden.

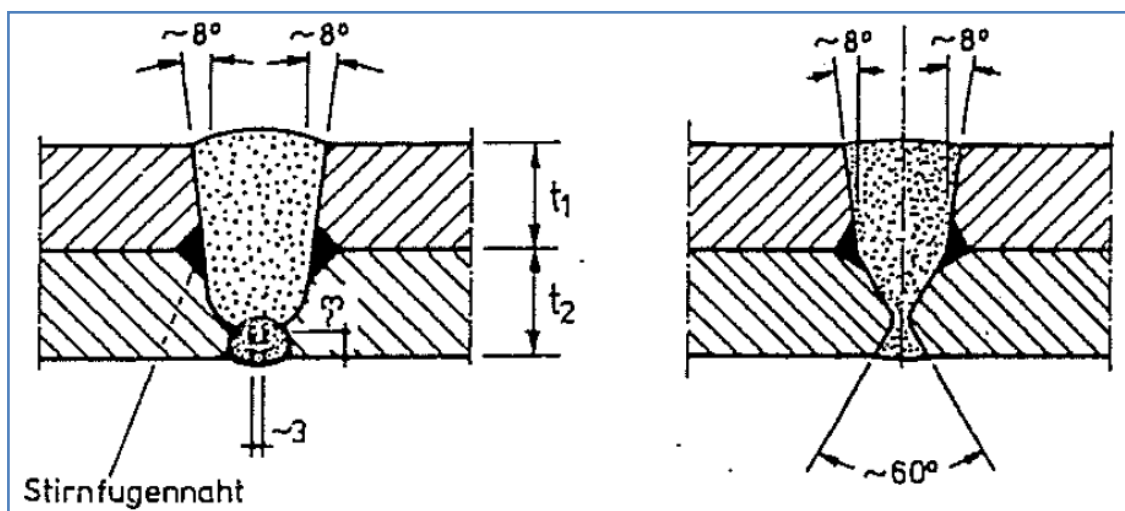


Abb. 12 Auszug aus der RIL 804 [25]

In der Abb. 12 werden zwei Möglichkeiten zur Fugenvorbereitung vorgeschlagen. Auf Grund der heutigen Fertigungsmöglichkeiten wird die Variante 2/3 X-Naht in den meisten Fällen bevorzugt. Die RIL 804 [25] schreibt eine Fugenvorbereitung am unteren Blech mit einem beidseitigen Flankenöffnungswinkel von 60° und einem Luftspalt zwischen den Blechpaketen vor. Die Flanken des oberen Bleches werden unter einem Winkel von 8° angeschrägt. Der Spalt zwischen den einzelnen Blechen an der Stelle, an der die Stirnfugennaht eingebracht wird, ist nicht geregelt.

3.3. Stand der Forschung und der zum heutigen Zeitpunkt bekannte Stand der Normung zum Kerbdetail Lamellenstoß

In der alten DS 804 [26] wurde der Lamellenstoß erstmals als Kerbdetail durch Versuchen eingeordnet. Die Schwingfestigkeitsversuche für den Stumpfstoß in übereinanderliegenden Gurtplatten wurden im Jahr 1974 von R. Olivier im Laboratorium für Betriebsfestigkeit in Darmstadt durchgeführt. [27] [28]

„Für den Teilbereich Eisenbahnbrückenbau ergab sich nach der Auflösung der Deutschen Bundesbahn im Jahre 1994 und der Trennung der Zuständigkeiten für unternehmerische und bauaufsichtliche Belange die Notwendigkeit, die bisher in DS 804 enthaltenen Regelungen ebenfalls zu trennen. Die Verantwortung für die bauaufsichtlichen Regelungen der DS 804 ging daher in den Zuständigkeitsbereich des Eisenbahn-Bundesamtes (EBA) als zuständiger Bauaufsichtsbehörde über.“ [29]

Das Eisenbahnbundesamt führte nach dieser Umstrukturierung die DIN Fachberichte als bauaufsichtliche Regelwerke für die Bemessung ein. Die unternehmerischen Belange der Deutschen Bahn AG werden durch die RIL 804 [25] geregelt.

Die DIN Fachberichte wurden als Vorbereitung auf den Eurocode in Deutschland entworfen und eingeführt. Sie sind größtenteils aus dem Eurocode heraus entstanden. Für den deutschen Brückenbau gab es bis zur Einführung der DIN Fachberichte kein gebündeltes Regelwerk zur Bemessung von Brücken. Vor der Einführung mussten aus mehreren verschiedenen Regelwerken die Bemessungsvorschriften zusammengesucht werden. Für Betriebsfestigkeitsberechnung wurden z.B. Kerbdetails aus der alten Kranbaunorm DIN 4113 [30] sowie aus den Regelwerken der Deutschen Bahn DS 804 [26] verwendet.

Die Angaben zur Ausführung (siehe 3.2) wurden zu 100% in die RIL 804 [25] übernommen. Im DIN Fachbericht 103 [31] wurde das aus der DIN EN 1993-1-9 [3] bekannte Nennspannungskonzept eingeführt. Die Kerbfalltabellen sind im Anhang des DIN Fachberichtes 103 [31] angefügt. Abb. 13 zeigt die Einordnung des Lamellenstoßes in die Kerbgruppe 71 in der Kerbfalltabelle des DIN Fachberichtes 103 [31]

In den Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components [17] werden diese Kerbgruppen als FAT Klassen bezeichnet. In den Kerbfalltabellen dieser IIW Empfehlung ist der Lamellenstoß nicht aufgeführt.

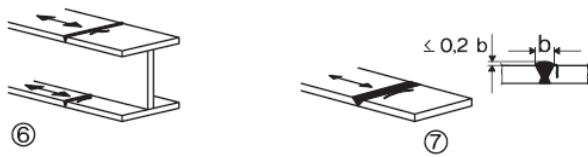
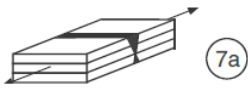
Kerbgruppe	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderung
80		<p>6) Querstöße in Walzquerschnitten oder geschweißten Blechträgern ohne Rückschnitte</p> <p>7) Querstöße in Blechen, Flachstählen, Walzquerschnitten oder geschweißten Blechträgern</p>	<p>6) und 7): Die Nahtüberhöhung muss $\leq 20\%$ der Nahtbreite sein</p> <p>1) bis 7):</p> <ul style="list-style-type: none"> - Auslaufbleche sind zu verwenden, anschließend zu entfernen und die Blechkante in Spannungsrichtung bündig zu schleifen. - Die Wurzellage ist auszuarbeiten und gegenzuschweißen oder auf abnehmbarer Keramikleiste zu schweißen.
71		<p>7a) Mehrteilige, quer zur Krafrichtung durch Stumpfnäht verbundene Bauteile</p>	<p>7a) Die einzelnen Gurtplatten sind zunächst mittels Stirnfugennähten zu verbinden. Diese müssen bei der Herstellung der Stumpfnähte erhalten bleiben.</p>

Abb. 13 Auszug aus den Kerbfalltabellen, DIN Fachbericht 103; Quelle: [31]

In den Kerbfalltabellen der DIN EN 1993-1-9 [3] sowie in der DIN EN 1993-2 [32] ist der Lamellenstoß nicht aufgeführt. Zur Zeit liegt in Deutschland der Nationale Anhang zur DIN EN 1993-2 [32] vor. Die DIN EN 1993-2/NA [2], ein Auszug aus diesem Entwurf zeigt die Abb. 14.

— Entwurf —

E DIN EN 1993-2/NA:2009-09

— in Ergänzung zu DIN EN 1993-1-9, Tabelle 8.3, Detail 1 gilt folgendes Detail als konfliktfreie Ergänzung:
Die einzelnen Gurtplatten sind zunächst mittels Stirnfugennähten zu verbinden. Diese müssen bei der Herstellung der Stumpfnähte erhalten bleiben.

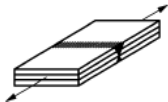
Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Bemerkung
112		<p>Mehrteilige, quer zur Krafrichtung durch Stumpfnäht verbundene Bauteile</p>	<p>Es muss der Dickeneinfluss des Gesamtpaketes berücksichtigt werden.</p>

Abb. 14 Auszug E DIN EN 1993-2/NA; Quelle: [2]

Im Entwurf der DIN EN 1993-2/NA [2] wird als Ergänzung zur DIN EN 1993-1-9 [3] das Kerbdetail Lamellenstoß der Kerbfallklasse 112 zugeordnet. In der Bemerkung wird angefügt, dass der Dickeneinfluss des Gesamtpaketes berücksichtigt werden muss. Wie genau dieser Dickeneinfluss berücksichtigt werden muss, ist in der DIN EN 1993-2/NA [2] nicht niedergeschrieben. Der normale Stumpfstoß ist ebenfalls der Kerbfallklasse 112 zugeordnet. Auch hier muss der Maßstabseffekt berücksichtigt werden. Die Formel für den Maßstabseffekt an dieser Stelle lautet:

$$\Delta\sigma_{c,red} = k_s * \Delta\sigma_c = (25/t)^{0,2} * \Delta\sigma_c \quad (25)$$

Nach Abschnitt 9.7 des DIN Fachberichtes 103 [31] muss der Einfluss der Wandstärke auf die Ermüdungsfestigkeit berücksichtigt werden.

Ausschnitt aus dem DIN Fachbericht 103 [31] Abschnitt 9.7:

- (1) Die Ermüdungsfestigkeit hängt von der Wanddicke des Grundwerkstoffes ab, in der ein Riss entsteht und weitwachsen kann.
- (2) Bei Wanddicken größer als 25mm ist der Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit durch Reduktion gemäß Formel

$$\Delta\sigma R_{t} = \Delta\sigma_R (25/t)^{0,25} \quad (26)$$

- (4) Die Reduktion der Ermüdungsfestigkeit infolge größerer Wanddicken ist nur bei Kerbfällen mit Schweißnaht quer zur Beanspruchung anzuwenden.

Es ist an dieser Stelle nicht klar geregelt ob beim Lamellenstoß die Formel für den Maßstabseffekt auf das Gesamtpaket oder auf die einzelne Lamelle angewendet werden muss. In Abb. 15 ist unter anderem der Unterschied zwischen den beiden Anwendungsmethoden dargestellt.

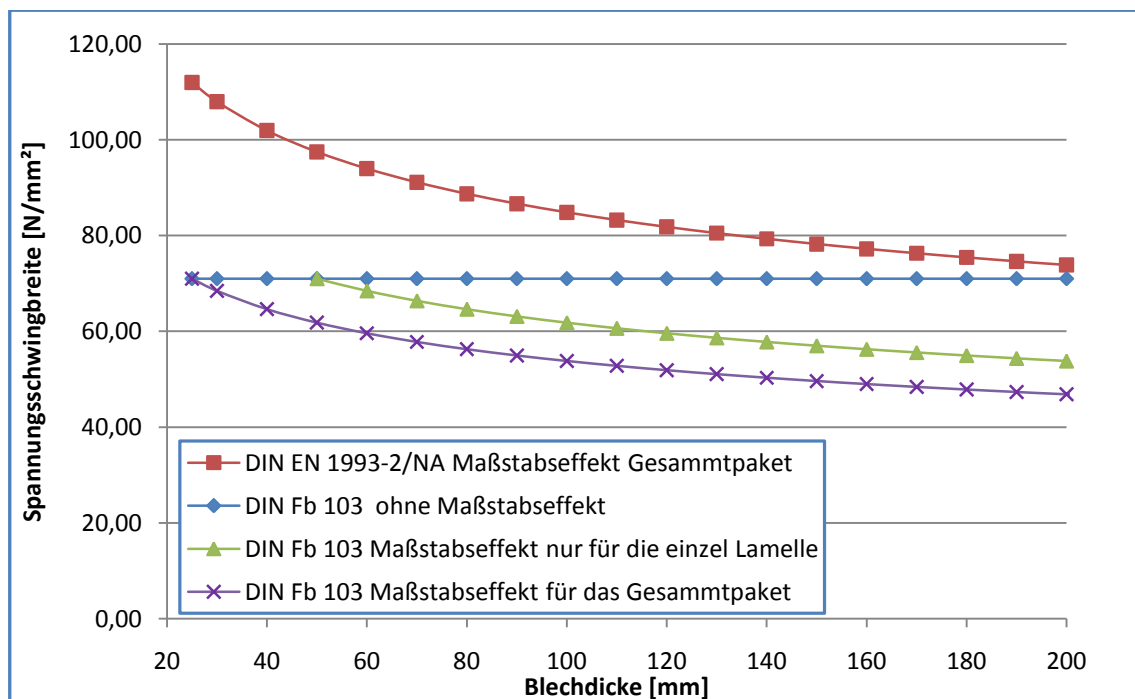


Abb. 15 Vergleich DIN Fb. 103 /-E- DIN EN 1993-2/NA; Quelle: eigene Darstellung

In der Abb. 15 sind die charakteristischen Spannungsschwingbreiten der einzelnen Normen in einem Diagramm dargestellt. Die Darstellung zeigt die Abhängigkeiten der Blechdicke zur Spannungsschwingbreite. Die Stützpunkte der Kurve für den nationalen Anhang wurden mit der Formel für den Maßstabseffekt im Stumpfstoß aus der DIN EN 1993-1-9 [3] an der Gesamtdicke des Blechpakets berechnet. Desweiteren sind zwei Kurven mit den Interpretationsmöglichkeiten zur Berücksichtigung des Maßstabseffektes aus dem DIN Fachbericht 103 [31] dargestellt. Als Orientierungshilfe ist der Kerbfall 71 ohne Maßstabseffekt abgebildet. Deutlich ist zu sehen, dass die Annahme im Entwurf der DIN EN 1993-2/NA [2] eine größere Spannungsschwingbreite zulässt. Durch die nicht deutlich ausgewiesene Regelung im DIN Fachbericht 103 [31] liegen zwei sehr stark von einander abweichende Ergebnisse vor.

Wie bereits erwähnt ist der Lamellenstoß nicht in den Kerbfalltabellen der DIN EN 1993-1-9 [3] enthalten. Allerdings erheben die Kerbfalltabellen der DIN EN 1993-1-9 [3] nicht den Anspruch auf Vollständigkeit. Daher erfolgt in der DIN EN 1993-1-9 [3] eine Öffnung durch die folgenden Abschnitte.

DIN EN 1993-1-9 [3] Ausschnitt aus Abschnitt 2

(3) *Ermüdungsversuche können durchgeführt werden, um Ermüdungsfestigkeiten für Details zu bestimmen, die nicht in diesem Teil enthalten sind; um die Lebensdauer von Prototypen unter wirklichen oder schadensäquivalenten Ermüdungsbelastungen zu bestimmen.*

(4) *Bei der Durchführung und Auswertung von Ermüdungsversuchen ist in der Regel EN 1990 heranzuziehen, siehe auch 7.1.*

DIN EN 1993-1-9 [3] Ausschnitt aus Abschnitt 7.1

ANMERKUNG 1

Soweit Ergebnisse von Ermüdungsversuchen benutzt wurden, um den Bezugswert $\Delta\sigma_c$ für einen bestimmten Kerbfall zu bestimmen, ist für $\Delta\sigma_c$ 2 Millionen Spannungsspiele statistisch als 95% - Fraktile für Überleben mit etwa 75% Vertrauenswahrscheinlichkeit ermittelt worden. Dabei wurden Standardabweichungen, Probekörpergröße und Eigenspannungen berücksichtigt. Die Anzahl der Proben (mindestens 10) wurde nach EN 1990, Anhang D berücksichtigt.

Somit ist es zulässig, Ergebnisse aus Schwingfestigkeitsversuchungen zur Bemessung von Kerbdetails heranzuziehen, wenn diese nachdem in der DIN EN 1993-1-9 [3] bzw. nach der DIN EN 1990 [33] ausgewertet werden (siehe Abs.2.2)

3.4. Der Einsatzbereich des Lamellenstoßes - erläutert an zwei Brückentypen

Im folgenden Abschnitt wird der Einsatz des Lamellenstoßes im Brückenbau an zwei Brücken erläutert. An der beispielhaften Stabbogenbrücke sowie an der Verbundbrücke wird der Spannungsverlauf im Lamellenstoß dargestellt.

3.4.1. Betrachtung und Erläuterung des Lamellenstoßes in der Stabbogenbrücke Frankfurt Galluspark

Bei der Stabbogenbrücke Frankfurt Galluspark (siehe Abb. 16) handelt es sich um einen stählernen und im Grundriss geraden Stabbogen mit senkrechten Flachstahl-Hängern. Der Überbau wurde mit seiner Stützweite von 81,10m und einem Bogenstich von 16m als reine Eisenbahnbrücke konzipiert. Die Bauhöhe der Fahrbahn beträgt 600mm. Die Ausbildung erfolgt durch ein Fahrbahndeckblech, welches in den Abständen von 700mm durch Querträger gestützt wird. Diese Querträger leiten die Belastung aus der Fahrbahn an die seitlichen Versteifungsträger weiter. Die Versteifungsträger liegen an den beiden Widerlagern auf. Die Tragwirkung der Versteifungsträger wird durch den obenliegenden Bogen unterstützt. Flachstahlhänger bilden die Aufhängung der Versteifungsträger an den Bogen aus. Dieser Bogen spannt ebenfalls von Widerlager zu Widerlager und ist am Fußpunkt mit dem Versteifungsträger verbunden. Das Zugband, welches das Aufweiten des Bogens verhindert, wird durch den Versteifungsträger ausgebildet. Aus diesem statischen System überlagern sich im Versteifungsträger die Kräfte aus der Biegeträgerwirkung und die Kräfte aus der Zugbandwirkung. Wie die Abb. 17 zeigt, wurde bei der Bogenbrücke Galluspark der Versteifungsträger als Hohlkasten ausgebildet. Oftmals wird bei diesem Brückentyp der Versteifungsträger auch als doppelt T-Querschnitt ausgebildet. [34] Die Ausbildung des Versteifungsträgers wird sehr oft von architektonischen Ansprüchen beeinflusst. Diese führen dazu, dass der Versteifungsträger als gedrungenes Profil ausgebildet wird. Diese Ausführung kann zu relativ dicken Ober- und Untergurten führen.



Abb. 16 Stabbogenbrücke Frankfurt Galluspark, Quelle: Max Bögl

Abb. 17 zeigt die in Abs. 3.1 erläuterte Materialverteilung für den Ober- und Untergurt des Versteifungsträgers der Stabbogenbrücke Frankfurt Galluspark. Hier wurde ein Grundblech gewählt, welches bei der kleinsten Spannung voll ausgelastet ist und im Bereich der größten Spannungsverteilung durch Lamellen verstärkt wurde. Dieses Grundblech müsste eigentlich als ein 70mm dickes Grundblech ausgebildet werden. Hier wurde ein 60mm dickes Grundblech verbaut, welches auch im Bereich der kleinsten Spannung durch eine Lamelle verstärkt wurde. Dieses hängt damit zusammen, dass nach der Materialbestellung eine Änderung an der Statik vorgenommen werden musste. Zur Erläuterung der Materialverteilung wurde vereinfacht nur die positive Momentenlinie in Abb. 17 dargestellt. Die Montagestöße wurden bei dieser Brücke nicht mit den Bedarfsstößen kombiniert. Im Baustellenstoß werden das Grundblech und die Lamelle gestoßen.

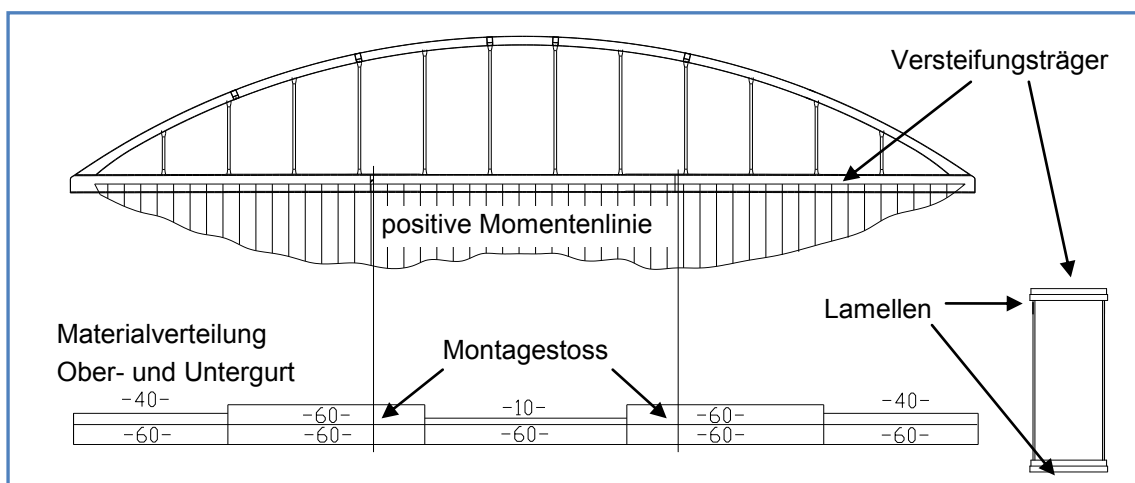
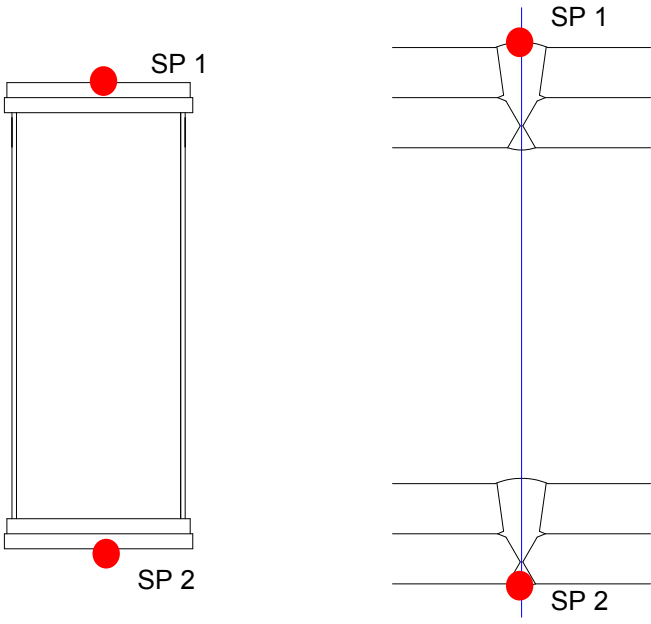


Abb. 17 Materialverteilung Bogenbrücke Frankfurt Galluspark, Quelle: eigene Darstellung

Da diese Brücke auf Grund der Abmaße und der dynamischen Belastung auf Ermüdungsfestigkeit bemessen werden muss, wurde auch im Lamellenstoß die zulässige Spannungsschwingbreite durch das Kerbdetail bestimmt. Die Bemessung erfolgte nach dem DIN Fachbericht 103 [31]. Der Spannungsverlauf und die sich aus dem Eigengewicht und der Verkehrslast ergebende Spannungsschwingbreite ist vereinfacht in Tab. 3 dargestellt.

Tab. 3 Spannungen im Versteifungsträger; Quelle: eigenen Darstellung

		
	Spannungspunkte	
Lastfall	SP 1 [N/mm ²]	SP4 [N/mm ²]
Summe aller ständigen Lasten	18,2	75
Verkehrslastüberlagerung	-51,6 / 54,9	101,4 / -33,2
Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$	69,46	108,2

3.4.2. Betrachtung der Verbundbrücke Lochkov unter dem Aspekt des Lamellenstoßes

„Mit 85 km Gesamtlänge ist der Ausbau des vierspurigen Schnellstraßenrings, der um Prag führt, das zurzeit größte und wichtigste Verkehrsbauprojekt in der Tschechischen Republik. Die Silničníokrh kolem Prahy (SOKP), (dt. Straßenring um Prag) verbindet nach ihrer Fertigstellung alle Autobahnen und zentralen Verkehrswege der I. und II. Klasse in und um Prag....Im Südwesten von Prag quert die Trasse zwischen Lahovice und Slivenec das als Naturschutzgebiet ausgewiesene Tal Lochkovské údolí in 65m Höhe.“ [35]



Abb. 18 Talbrücke Lochkov im Bauzustand, Quelle: Max Bögl

Die Talbrücke Lochkov (Abb. 189) ist eine klassische Verbundbrücke und wurde als Fünffelderbrücke mit den Stützweiten 70m / 80m / 99m / 94m / 80m gebaut. Das statische System dieser Brücke kann vereinfacht als Durchlaufträger mit fünf Feldern angesehen werden. Als Besonderheit ist zu beachten, dass die schrägen Pfeiler monolithisch an den Überbau angeschlossen wurden. Der Überbau, welcher in der Draufsicht stark gekrümmt ist, (siehe Abb. 20) wurde als einteiliger Kasten ausgebildet, der eine Gesamtbreite von 35,4 m hat. Der Obergurt des Kastens ist als Stahlbetongurt ausgebildet, welcher gleichzeitig als Fahrbahn dient. Der Untergurt und auch die Stege wurden als ausgesteifte Blechfelder ausgebildet. Der Verbundquerschnitt ist in Abb. 19 dargestellt.



Abb. 19 Verbundquerschnitt der Talbrücke Lochkov, Quelle: Max Bögl

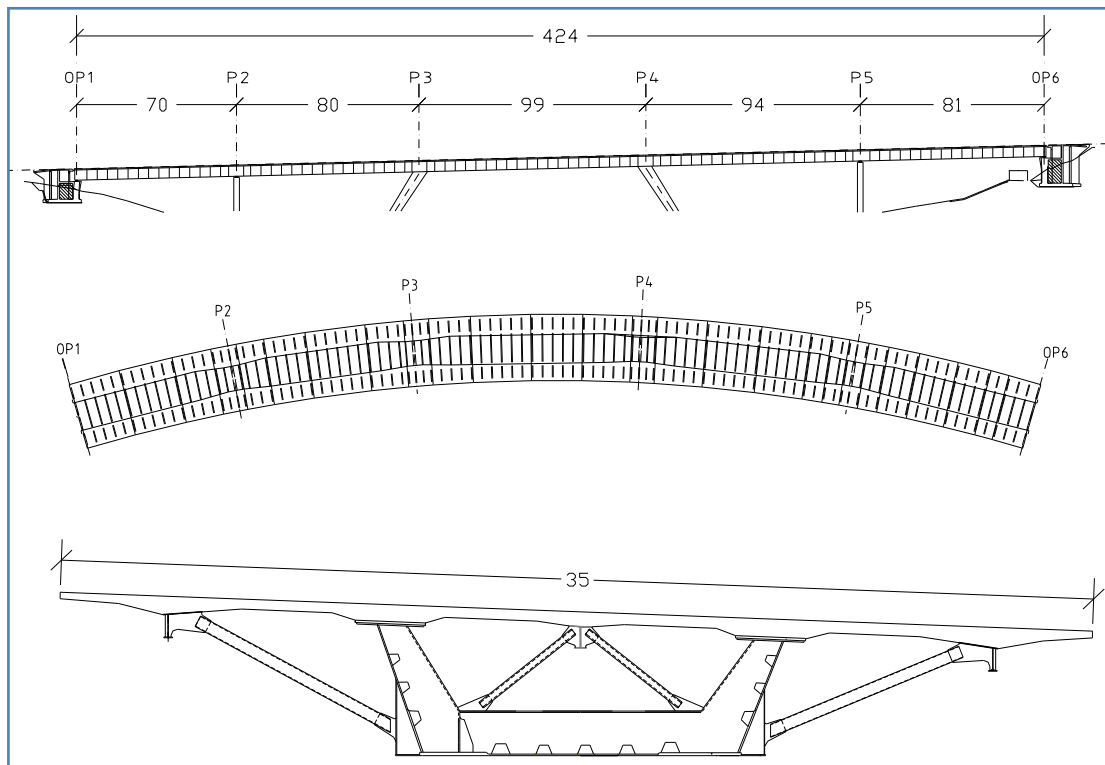


Abb. 20 Brückenansichten und Querschnitt, Quelle: Max Bögl

Um die Torsionskräfte abtragen zu können, ist der Querschnitt durch Querrasterwerke ausgesteift. Der auskragende Betongurt wird in den gleichen Abständen zum Untergurt mit Diagonalen abgestützt. Die Stahlbetonplatte wird durch Kopfbolzendübel, welche auf dem Obergurt des Stahlquerschnittes aufgeschweißt sind, angeschlossen. Dieser Obergurt hat auf der gesamten Brückenlänge eine einheitliche Breite, damit die Schalung beim Betonvorgang nicht verändert werden muss. Aus den unterschiedlichen Stützweiten und der für Durchlaufträger typische Momentenlinie wurden für den Obergurt Blechdicken zwischen 40mm und 115mm verbaut. Im Bereich der Stützenachsen ergeben sich sehr große Stützmomente und der Obergurt, welcher in diesem Fall Zugkräfte aufnimmt wurde in diesem Bereich durch Lamellen mit Blechdicken 35mm bis 90mm verstärkt. Die Verstärkung der Lamellen erfolgte in erster Linie aus Gründen der Blechdickenbegrenzung (siehe Abs. 3.1). Die Materialverteilung über der Stützenachse 5 für den Obergurt ist in Abb. 21 dargestellt. Auf Grund der großen Bauteilgewichte (ca. 160t) konnten im Stützbereich nur relativ kurze Schusslängen gefertigt werden, und die Lamellen und das Grundblech mussten auf der Baustelle gestoßen werden. Der bei dieser Arbeit betrachtete Lamellenstoß aus den Blechpaketen 100mm + 90mm und 100mm + 80mm liegt über dem Pfeiler 5 und gleicht gleichzeitig den Dicken sprung der Bleche aus.

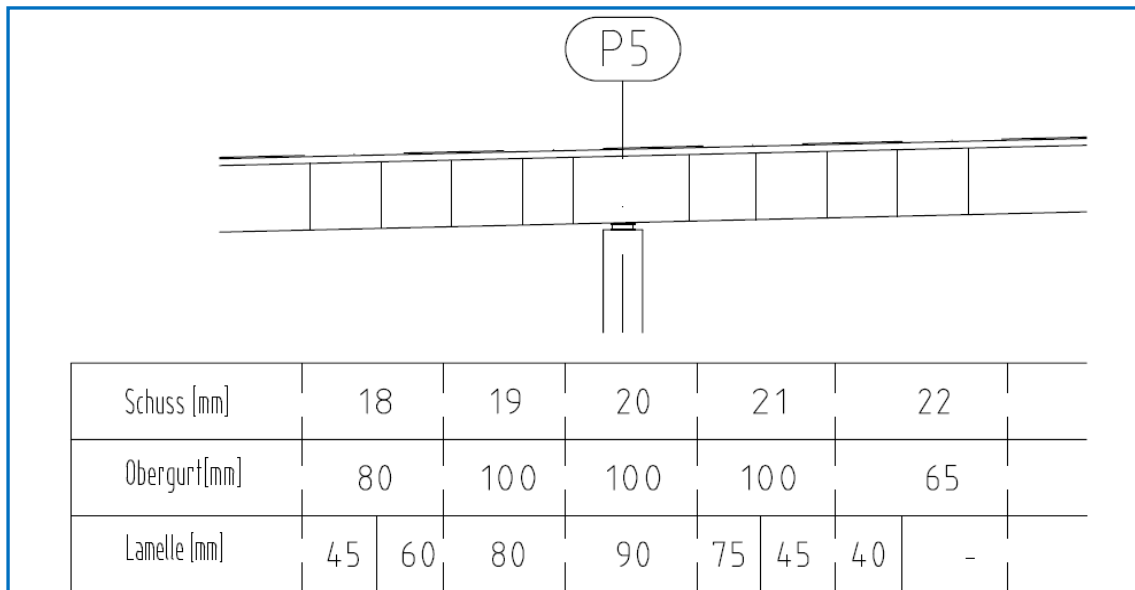


Abb. 21 Ausschnitt Materialverteilung Brücke Lochkov Pfeiler 5, Quelle: Max Bögl

Montiert wurde diese Brücke im Taktschiebepverfahren. Der Stahlbetongurt wurde nach dem Einschieben mit einem Schalwagen aufbetoniert. Aus diesem Montageverfahren ergeben sich vereinfacht mehrere Querschnitts- und Spannungszustände.

- 1) Beim Einschub trägt der Stahlquerschnitt sein Eigengewicht (die große Stützweite ergibt vor dem Auffahren auf den Pfeiler einen sehr großen Kragarm)
- 2) Beim Betonvorgang erhöht sich das Eigengewicht um die Gewichte aus dem Nassbeton der Bewehrung und die Last des Schalwagens. Die Lasten werden vom Stahlquerschnitt abgetragen.
- 3) Nach dem Abbinden des Betons trägt der Stahlbetonobergurt mit, und der Verbundquerschnitt trägt die Eigenlast und die Verkehrslast ab.

Für die Bemessung auf Ermüdung ist der Spannungszustand sowie der Querschnitt aus Punkt 3 maßgebend. Die Ermüdungsnachweise wurden bei diesem Bauwerk nach der DIN EN 1993-1-9 [3] durchgeführt. Die Spannungswerte über Pfeiler 5 sind in der Tab. 4 dargestellt. Die Verkehrslast stellt die Spannungsschwingbreite dar; im Vergleich zu dem hohen Eigengewicht fällt sie sehr gering aus.

In der Tab. 5 sind die Spannungswerte am Lamellenstoß am oberen und unteren Blech dargestellt. Durch den linearen Spannungsverlauf fallen die Spannungswerte am unteren Blech niedriger aus.

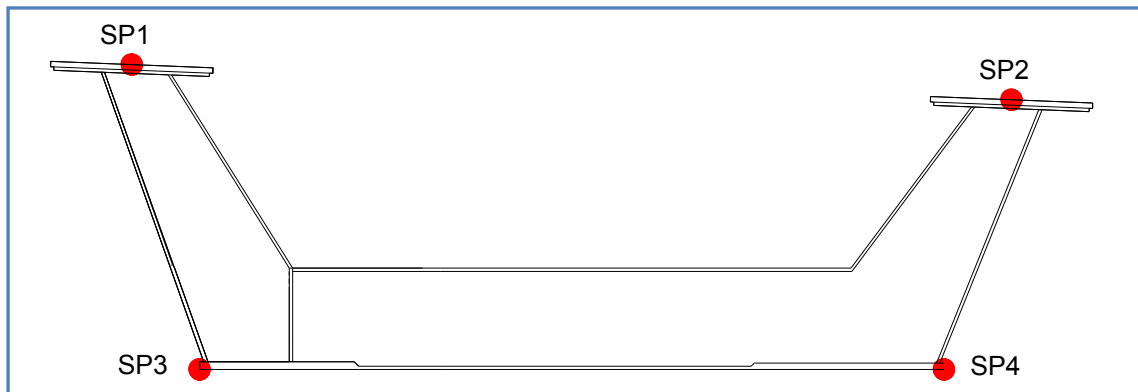
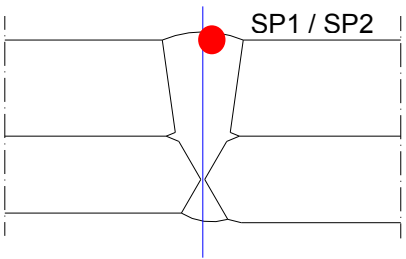


Abb. 22 Spannungspunkte Brücke Lochkov, Schnitt Pfeiler 5; Quelle eigene Darstellung

Tab. 4 Spannungen in den einzelnen Spannungspunkten; Quelle: eigene Darstellung

190mm				
Lastfall	SP 1 [N/mm ²]	SP2 [N/mm ²]	SP3 [N/mm ²]	SP4 [N/mm ²]
Anschnitt Lamellenstoß 190mm				
Summe aller ständigen Lasten	151,4	165,3	-160,1	-146,2
Verkehrslastüberlagerung	17,6	17,8	-19,2	-19,0
Anschnitt Lamellenstoß 180mm				
Summe aller ständigen Lasten	170,6	186,3	-181,7	-166,0
Verkehrslastüberlagerung	19,4	19,6	-21,7	-21,5

Tab. 5 Spannungen im Lamellenstoß am Anschnitt; Quelle: eigenen Darstellung

Spannung im Lamellenstoß	SP1 ständige Lasten [N/mm ²]	SP2 ständige Lasten [N/mm ²]	SP1 Verkehrslast [N/mm ²]	SP1 Verkehrslast [N/mm ²]
oben 190mm	151,4	165,3	17,6	17,8
untern 190mm	138,6	150,1	16,1	16,1
oben 180mm	170,6	186,3	19,4	19,6
untern 180mm	156,9	170,8	17,8	17,9

4. Das Musterstück I „Lamellenstoß Brücke Lochkov“

Bei der Berechnung bzw. bei der Fertigung des Überbaues der Talbrücke Lochkov (diese Prozesse gingen teilweise in einander über) wurde bekannt, dass das Kerbdetail Lamellenstoß nicht eurocodekonform ist. (siehe 3.3)

Als Reaktion auf dieses Problem wurden drei Maßnahmen ergriffen:

- In Absprache mit dem Bauherrn wurde die zulässige Spannungsschwingbreite im Lamellenstoß auf $\Delta\sigma = 36\text{N/mm}^2$ herabgesetzt.
 - Schweißen eines Musterstückes unter Baustellenbedingungen
 - Erstellung einer Verfahrensprüfung zu diesem Musterstück
- Einholen eines Gutachtens der RWTH Aachen (siehe Anhang F)

4.1. Beschreibung des Schweißprozesses für das Musterstücke I

Im September/Oktobre 2008 wurde entsprechend der Bauherrenanforderung bei der Firmengruppe Max Bögl in Sengental ein Musterstück des Lammellenstoßes unter simulierten Baustellenbedingungen geschweißt. Als Musterstoß wurde der Lamellenstoß über dem Pfeiler 5 gewählt, da dieser die größten Blechdicken aufweist.

In der Werkstatt wurden die Blechpakete 100+90mm und 100+80mm durch die Stirnfugennaht mittels MAG-Schweißen unter Berücksichtigung der Schweißanweisung (siehe Anhang B) vorgebunden. Zum Zeitpunkt der Fertigung des Musterstückes I war kein 80mm Blech in der benötigten Güte verfügbar. Aus diesen Gründen wurde ein 90mm Blech auf 80mm herunter gefräst. Die Materialkennwerte des S355NL sind in Anlage 1 wiederzufinden. Vor und während des Schweißprozesses wurden die Bleche im Bereich der Stirnfugennaht durch hydraulische Pressen aufeinander gepresst. (siehe Abb. 24) Die Vorwärmtemperatur ist in der Schweißanweisung auf 150°C festgelegt. Wie genau die Vorwärmtemperatur in das Blechpaket eingebracht wurde und diese kontrolliert wurde, konnte vom Verfasser nicht nachvollzogen werden. Desweiteren sind keine Angaben über die tatsächlichen Schweißparameter vorhanden. Nach dem Schweißen der Stirnfugennaht wurde eine Oberflächenrissprüfung nach DIN EN 571-1 [36] durchgeführt.

Im zweiten Arbeitsgang wurden die Lamellen in eine Unterkonstruktion eingelegt. Diese Unterkonstruktion war nach dem in Abb. 23 dargestellten Schema ausgeführt. Zwei Träger HEB 1000 standen im Abstand der Stege des Obergurtes der Brücke (siehe Abb. 25) nebeneinander. Die Obergurte waren so ausgeklinkt, dass die Lamellenpakete von oben in die Träger eingelassen werden konnten. Unterhalb des Lamellenpaketes war die Trägerkonstruktion durch Steifen ausgesteift und untereinander verbunden (siehe Abb. 25). An dieser Stelle wurde in den Stegen ein Freischnitt ausgeführt, um ein durchgängiges Durchschweißen der Gegenlagen in der Position PE zu gewährleisten. Diese Ausführung entspricht 1:1 der Ausführung in der Talbrücke Lochkov. In Verlängerung dieser Freischnitte wurde der Träger in Richtung des Untergurtes

entsprechend dem Schweißspalt in den Stegen der Brückenkonstruktion eingeschlitzt, um ein zwängungsfreies Verformen der Unterkonstruktion zu gewährleisten. Dieser Spalt entspricht dem Schweißnahtspalt in den Stegen der Brückenkonstruktion. Die Trägerkonstruktion wurde durch Betongewichte beschwert, um das Gegengewicht der Brücke während des Schweißens des Lamellenstoßes zu simulieren. Durch diese Maßnahmen sind die entstandenen Eigenspannungen mit denen im späteren Bauwerk vergleichbar.

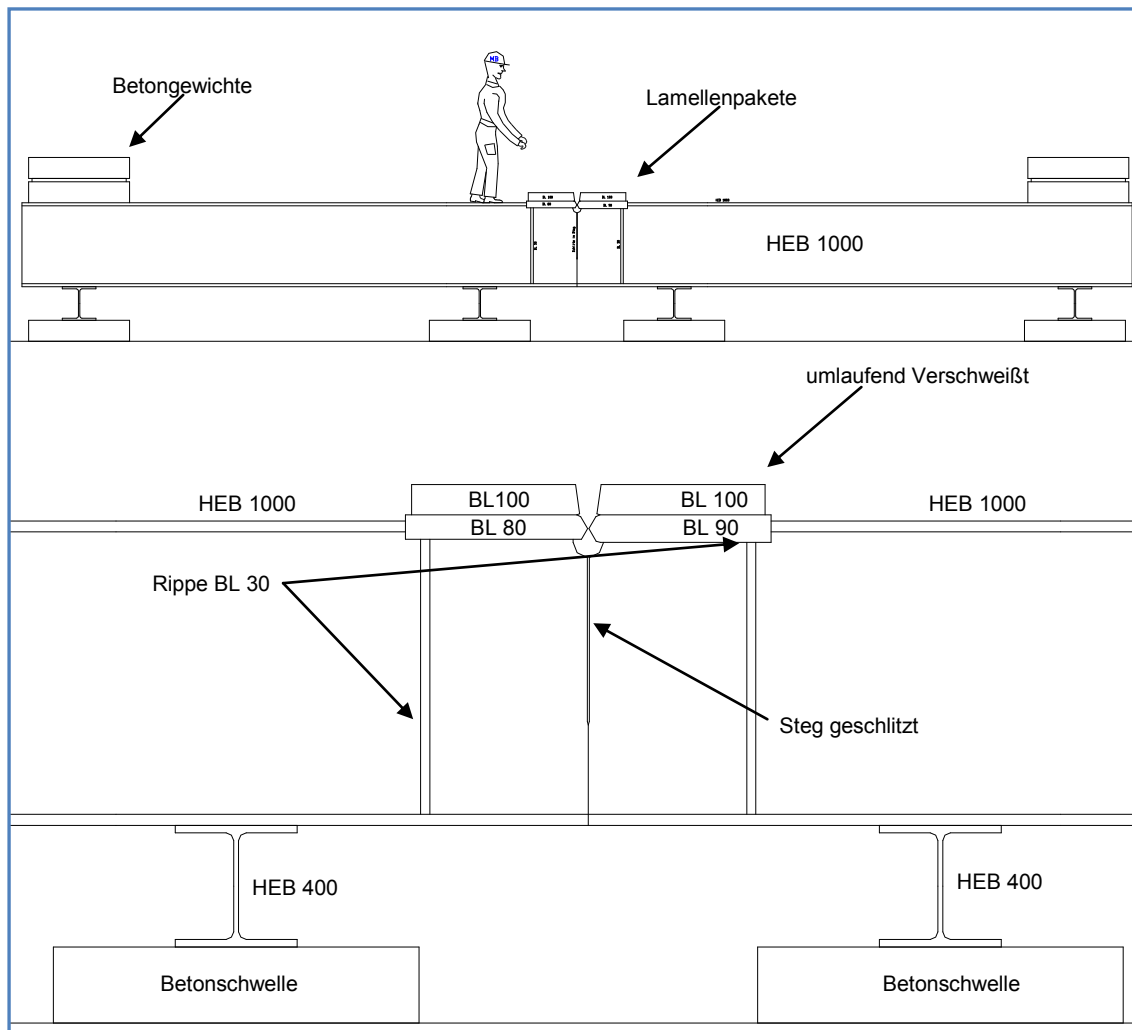


Abb. 23 Aufbau Musterschweißung, Quelle: Max Bögl

Die Trägerunterkonstruktion wurde auf dem Werksgelände der Firmengruppe Max Bögl durch ein Zelt im Freien eingehaust (siehe Abb. 27). Von oben wurden die Lamellenpakete in die Unterkonstruktion eingelegt und nach dem Ausrichten des Schweißspaltes mit dieser umlaufend verschweißt.



Abb. 27 Einhausung; Quelle: Max Bögl

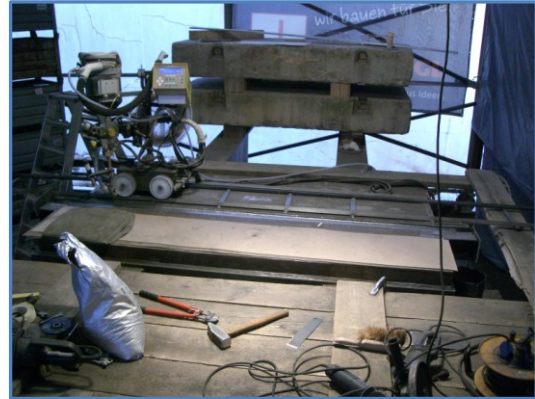


Abb. 26 Ballast; Quelle: Max Bögl



Abb. 25 Freischnitt im Steg; Quelle: Max Bögl



Abb. 24 hydraulische Presse; Quelle: Max Bögl

Nach diesen Vorbereitungen konnte mit der eigentlichen Baustellenschweißung begonnen werden. Von der Unterseite wurde in den Schweißspalt eine Keramikschweißbadsicherung mit rundem Profil eingeklebt. In der Position PA wurde von der Oberseite die ersten drei Lagen Schweißgut eingebracht. Als Zusatzwerkstoff wurde eine Metallpulver-Fülldrahtelektrode, Durchmesser 1,2mm, mit einer Zulassung der Deutschen Bahn verwendet. Nach dem Schweißen der Wurzellagen wurde die Keramikbadsicherung entfernt und von unten die Wurzel gegengeschliffen. Nach dem Schleifprozess wurde eine Oberflächenrisssprüfung nach DIN EN 571-1 [36] durchgeführt. Von der Unterseite wurden in Position PE wiederum 3 Lagen gegengeschweißt. Für die Überkopfschweißungen wurde eine Rutil-Fülldrahtelektrode mit dem Durchmesser 1,6mm verwendet. In wie weit die Zwischenlagentemperaturen kontrolliert wurden ist dem Verfasser nicht bekannt. Nach dem Schweißen der Wurzellagen wurden, im Wechsel von oben und unten die Fülllagen eingebracht. Die Oberseite wurde durch den Prozess 125 UP geschweißt. Hier wurde eine 4mm starke basische- Fülldrahtelektrode verwendet

und ebenfalls ein basisches Schweißpulver. Es wurden auf der Oberseite ca. 150 Lagen und auf der Unterseite ca. 38 Lagen eingebracht. Die Schweißarbeiten wurden in drei Schichten durch mehrere Schweißer ohne Unterbrechung ausgeführt. Durch das wechselseitige Schweißen bis zur Blechtrennung wurden die Winkelschrumpfungen eliminiert. Die Schrumpfkkräfte, die im Bereich über der Blechtrennung aufgetreten sind und nicht durch Schweißen auf der Gegenseite ausgeglichen werden konnten, waren nicht ausreichend groß, um das Bauteil nennenswert zu verformen.

Nach den gesamten Schweißarbeiten wurden die verschweißten Lamellenpakete aus der Unterkonstruktion herausgetrennt. An diesem Blechpaket wurde eine Ultraschallprüfung nach DIN EN 1712 [37], DIN EN 1713 [38], DIN EN 1714 [39] an der kompletten Schweißnaht nach dem in Abbildung 3 dargestellten Schema durchgeführt. Als Bewertungsgruppe war die Bewertungsgruppe B nach DIN EN ISO 5817 [40] vorgeschrieben.

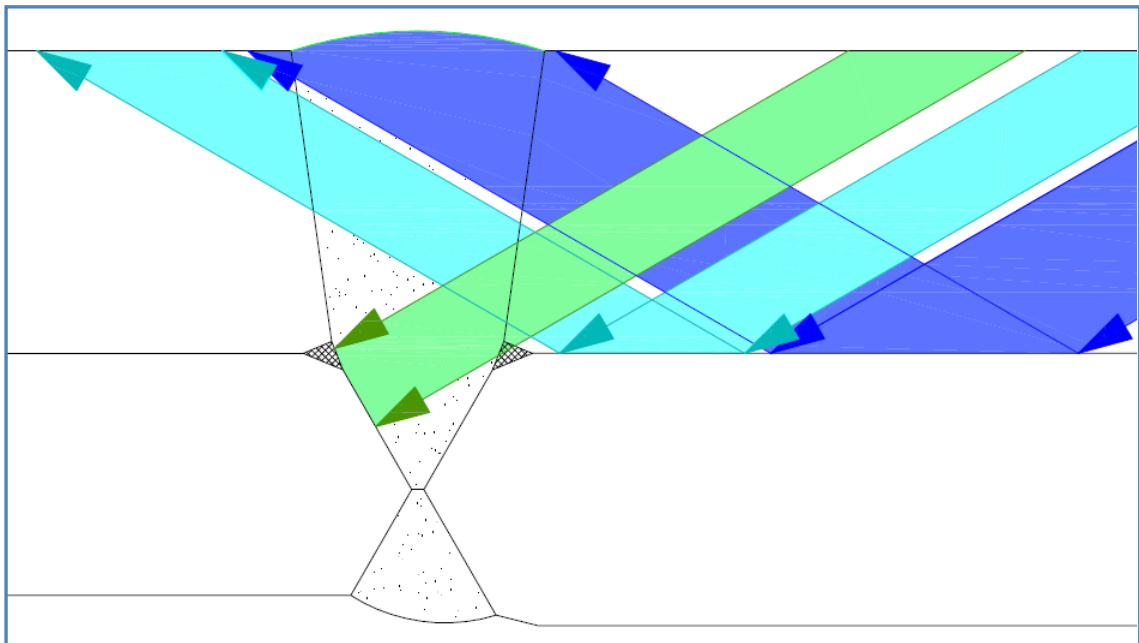


Abb. 28 Ultraschallprüfschema, Quelle: Max Bögl

An dieser Stelle sei erwähnt, dass eine Bewertung des Wurzelpunktes der Stirnfugennaht durch ein zugelassenes zerstörungsfreies Verfahren nicht möglich ist. Würde man beispielsweise versuchen, eine Fehleranalyse durch die Ultraschalltechnik durchzuführen würde die Blechtrennung dazu führen, dass der Prüfer die Blechtrennung von einer beispielhaften Rissindizierung nicht unterscheiden könnte. Der Verfasser sieht diesen Punkt als unkritisch an, da beispielsweise der Wurzelpunkt einer Kehlnaht auch nicht durch zerstörungsfreie Prüfung erfasst werden kann. Die daraus möglichen Schweißnahtunregelmäßigkeiten am Wurzelpunkt fließen in die Nachweise auf Ermüdung ein. Im Kerbbereich eines solchen Details wird die zusätzliche Spannungsschwingbreite herabgesetzt. Dies geschieht durch die einzelnen Kerbgruppen. Die Einordnung eines Kerbdetails in diese Kerbgruppen findet durch Ermüdungsversuche statt. (siehe Abs. 2.1)

4.2. Mikroskopische Untersuchungen

Das Musterstück aus Abs. 4 wurde in mehrere Abschnitte aufgeteilt. An einem dieser Abschnitte wurde die Verfahrensprüfung durchgeführt; ein weiterer Teil dem Bauherren übergeben. Bei der Firmengruppe Max Bögl wurden einige Abschnitte mit den in Tab. 6 angegebenen Abmaßen eingelagert. Die Position der Abschnitte in der Schweißnaht des Musterstückes konnte vom Verfasser nicht nachvollzogen werden.

Tab. 6 Abmaße der Musterstücke; Quelle: Max Bögl

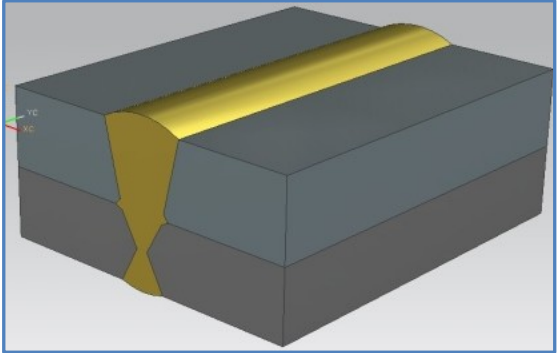
Länge längs zur Schweißnaht [mm]	Breite quer zur Schweißnaht [mm]	
500	400	
220	400	
130	400	
50	400	

Abb. 29 Musterstück; Quelle: eigene Darstellung

Für diese Abschnitte war keine weitere Verwendung vorgesehen, so dass an diesen weitere Versuche durchgeführt werden konnten. Das nachfolgende Versuchsprogramm wurde mit dem Ziel ausgewählt, eine Aussage zur Ermüdungsfestigkeit im Lamellenstoß treffen zu können.

Versuchsprogramm:

- makroskopische Untersuchungen
- 2. Schweißversuch und Untersuchung der Stirnfugennaht
- Ermüdungsversuche an Kleinversuchskörpern
- Ermüdungsversuche am Gesamtschweißnahtquerschnitt

Von den vorhandenen Abschnitten wurden wie in Abb. 30 zu erkennen -mehrere Platten mit einer Stärke von 25mm durch Sägen heruntergeschnitten. In diesen Abschnitten lag die Schweißnaht im Zentrum. Um Aufhärtungen im Randbereich zu vermeiden, wurde aus diesen flachen Scheiben die Prüfkörpergeometrie für die Kleinversuche durch Wasserstahlschneiden herausgeschnitten. Der Querschnitt im Bereich der Schweißnaht beträgt 50x25mm. Für die Großversuche wurden die Platten nicht durch Wasserstahlschneiden weiterbearbeitet, sondern die Oberflächen durch Fräsen bearbeitet. Die Stärke der Versuchskörper betrug nach dem Fräsen 15mm. Dieser Arbeitsgang resultiert daraus, dass die Entscheidung für die Großversuche nach dem Sägen der Platten gefallen ist und nur eine Prüfmaschine mit begrenzten Kräften zu Verfügung stand.

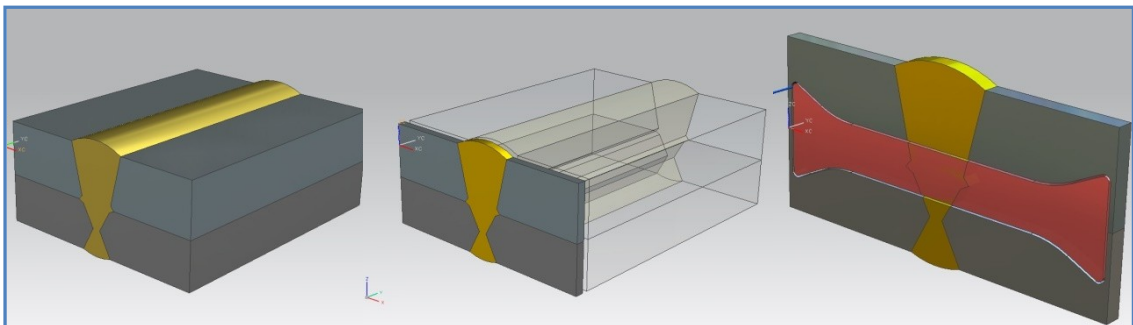


Abb. 30 Zuschnitt der Versuchskörper; Quelle: eigene Darstellung

4.3. Anfertigung der Makroschliffe

Es wurden Makroschliffe an den Kleinversuchskörpern und ebenfalls an allen Großversuchskörpern hergestellt. Auf Grund der Geometrie, die für Makroschliffe außergewöhnlich groß ist, wurden diese Schliffe durch Schleifen mit einem Band- und Schwingschleifer erzeugt, da die Geometrie für übliche Tellerschleifer zu groß war. Es wurde mit den Körnungen 40/60/80/100/120/240/400/600 geschliffen. Die geschliffenen Oberflächen wurden mit einer Mischung aus Salpetersäure 65%ig und Ethanol 96 %ig im Verhältnis 1:20 geätzt. Nach dem Aufbringen des Ätzmittels mit einem Wattebausch wurde das Ätzmittel durch Leitungswasser abgespült. Die Oberfläche wurde durch einen Überzug mit Klarlack konserviert.

4.4. Durchführung und Dokumentation der mikroskopischen Betrachtung an den Kleinversuchskörper

Im Bereich der Stirnfugennaht wurden mikroskopische Betrachtungen mit einem Dino-Lite USB Mikroskop durchgeführt. Diese Untersuchungen wurden im unbelasteten Zustand an den Versuchskörpern durchgeführt. Alle Ergebnisse an den Kleinversuchskörpern wurden nach dem unteren und in Abb. 31 erläuterten System in Tab. 7 dokumentiert. Die mikroskopischen Untersuchungen wurden auf beiden Seiten der Versuchskörper an der rechten und linken Stirnfugennaht (siehe Abb. 32 & Abb. 33), mit 200facher Vergrößerung durchgeführt.

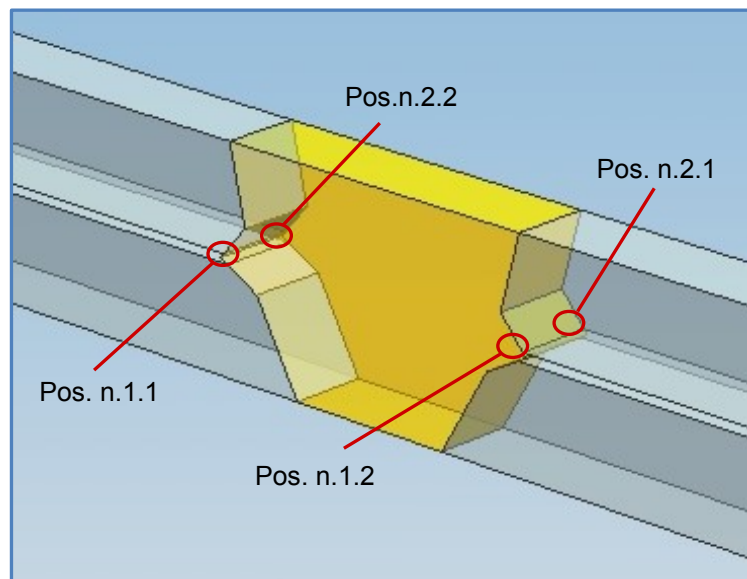
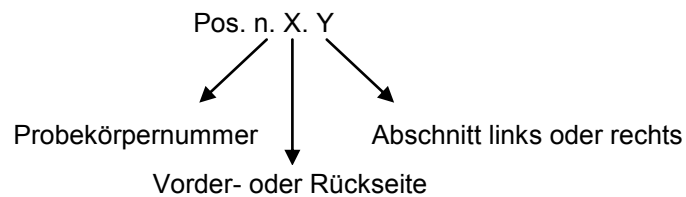
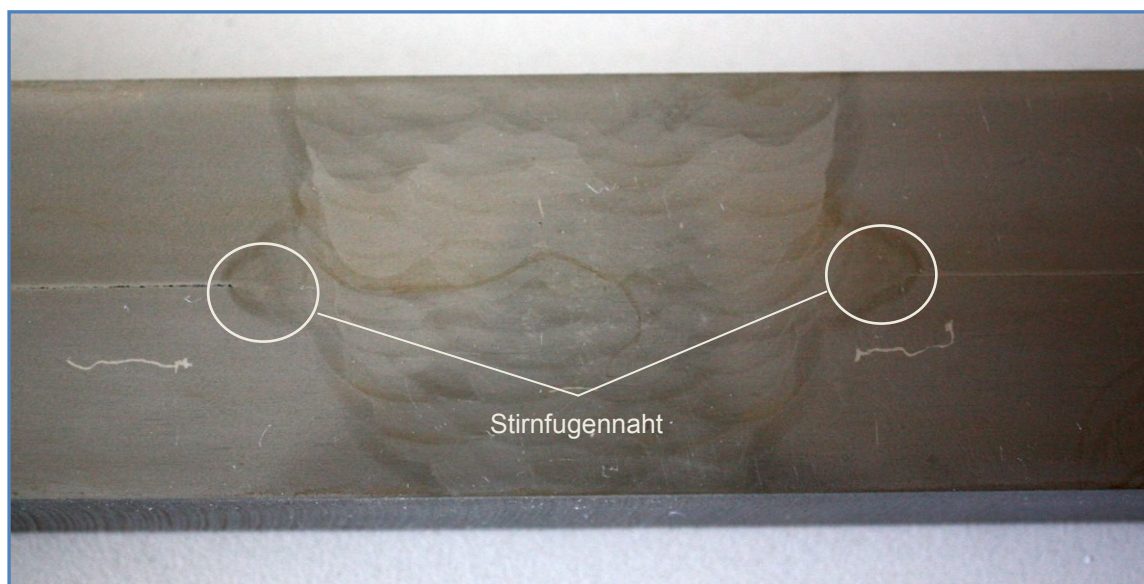
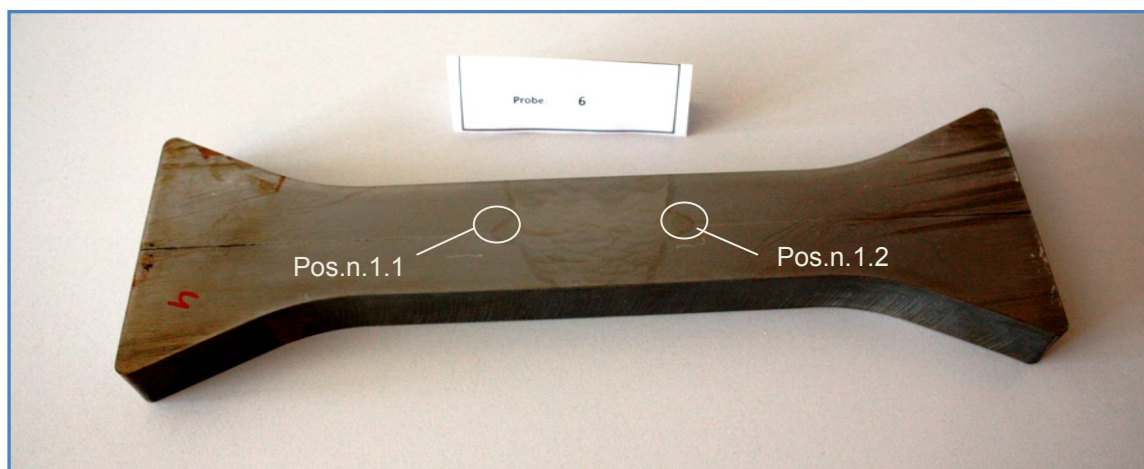


Abb. 31 Bereiche der mikroskopischen Untersuchung; Quelle: eigene Darstellung

Tab. 7 Ergebnisse mikroskopischer Betrachtung an Kleinversuchskörpern; Quelle: eigenen Darstellung

Probekörper n	Vorderseite Bereich 1 Pos. n.1.1 [mm]	Vorderseite Bereich 2 Pos. n.1.2 [mm]	Rückseite Bereich 1 Pos. n.2.1 [mm]	Rückseite Bereich 2 Pos. n.2.2 [mm]
K.Pk.2	0,45 / -	0,72 / 0,69	- / -	0,61 / -
K.Pk.3	- / -	- / -	0,79 / -	- / -
K.Pk.4	- / -	- / -	- / -	- / -
K.Pk.5	- / -	0,63	- / -	- / -
K.Pk.6	- / -	- / -	0,02 / 0,02	0,34 / -

**Abb. 32 Makroschliff Kleinversuchskörper; Quelle: eigene Darstellung****Abb. 33 Position der mikroskopischen Untersuchungen; Quelle: eigene Darstellung**

Die Ergebnisse weisen bei vielen Versuchskörpern eine Rissindizierung im Bereich der Stirnfugennahtwurzel auf (siehe Abb. 34&Abb. 35). Die Risse starten in allen Fällen am Wurzelpunkt an der Blechtrennung und wachsen im Bereich der Wärmeeinflusszone in den Grundwerkstoff.

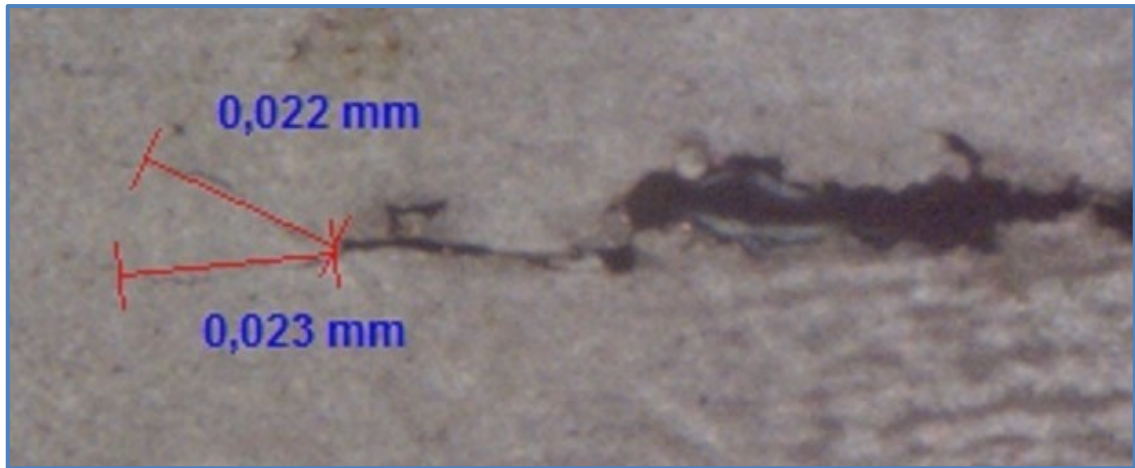


Abb. 34 Mikroskopische Aufnahme; Quelle: eigene Darstellung

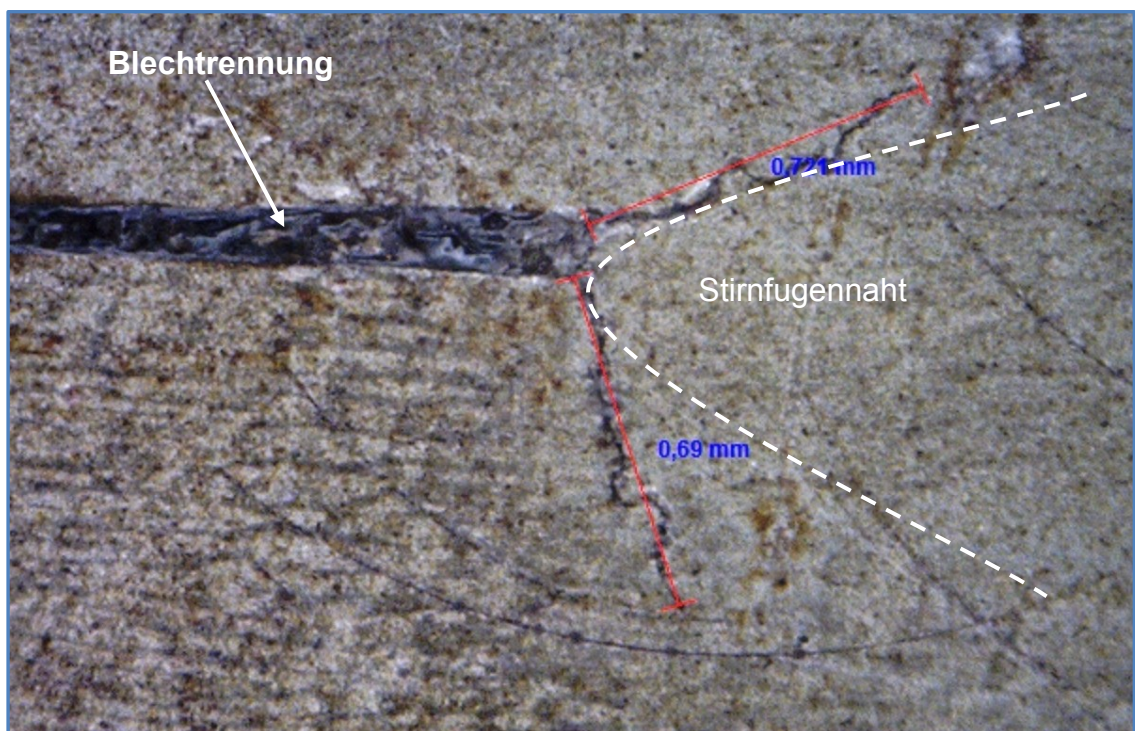


Abb. 35 Mikroskopische Aufnahme; Quelle: eigene Darstellung

4.5. Durchführung und Dokumentation der mikroskopischen Untersuchungen an den Großversuchskörpern

Ebenfalls im unbelasteten Zustand wurden an den Großversuchskörpern im Bereich der Stirnfugennaht mikroskopische Aufnahmen mit einer 200 fachen Vergrößerung an einem Makroschliff mit einem Dino-Lite USB Mikroskop aufgenommen. Bei größeren Risslängen wurden die Risslängen durch Messungen an MT- Prüfbildern (siehe Abb. 37) ermittelt. Die Ergebnisse sind in Tab. 8 nach den Kerbbereichen in Abb. 36 aufgelistet. Die Magnetpulverprüfungen wurden nach DIN EN 1290 [41] mit einem Prüfgerät Typ UM-8 bei einer magnetischen Feldstärke $>2,5\text{kA/m}$ durchgeführt. Als Untergrundfarbe wurde Helling Nr. 104A verwendet. Die Magnetpulversuspension war eine Helling NRS 103. Die Helligkeit am Prüfort war größer 600LUX.

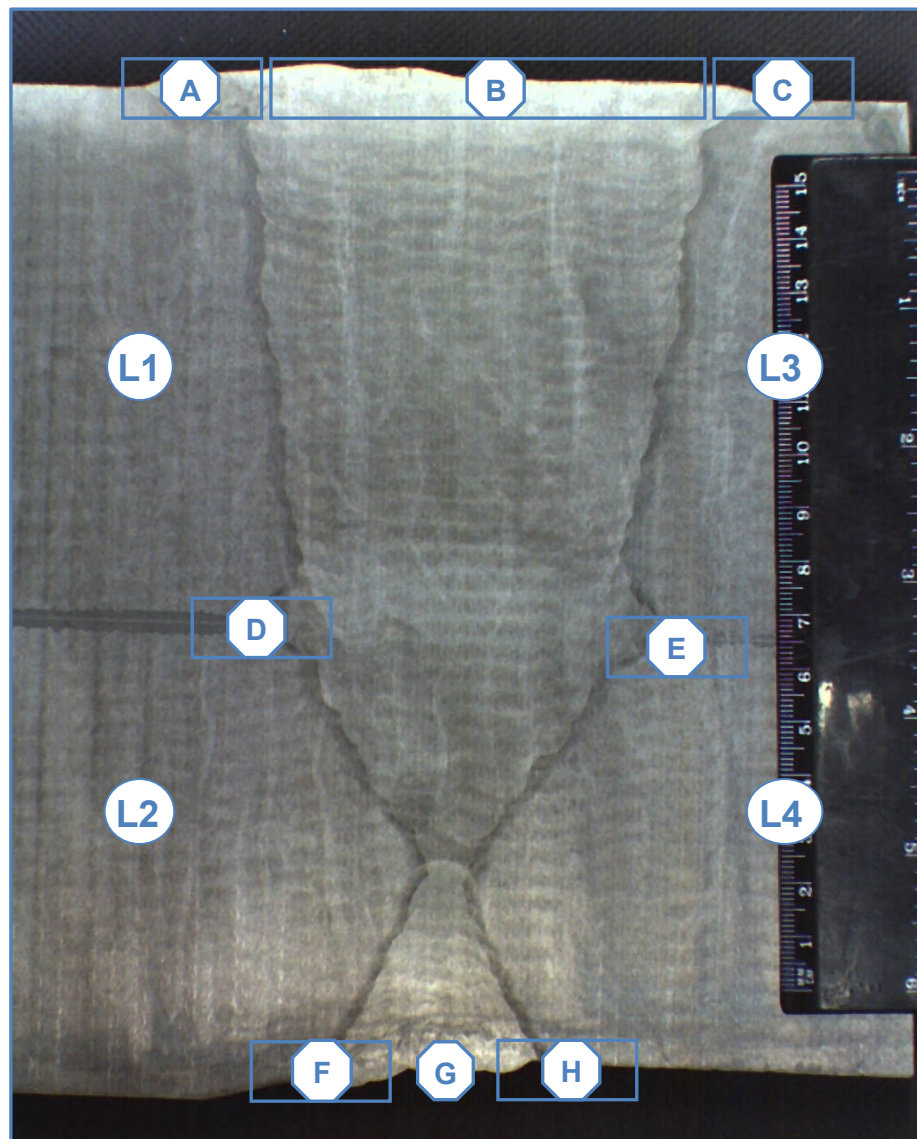


Abb. 36 Kerbbereiche am Gesamtquerschnitt; Quelle: Max Bögl

Die Ergebnisse der Oberflächenrissprüfung weisen im Gegensatz zu den Kleinversuchskörpern teilweise größere Risse auf. Dies ist dadurch zu erklären, dass die Versuchskörper an einer anderen Stelle aus dem Musterstück entnommen wurden. Die Rissverläufe sind vergleichbar mit den Rissverläufen bei den Kleinversuchskörpern. Die Risse starten ebenfalls am Wurzelpunkt der Stirnfugennaht im Bereich der Blechtrennung und wachsen an der Wärmeeinflusszone entlang in den Grundwerkstoff hinein.

Tab. 8 Ergebnisse Untersuchungen Großversuchskörper; Quelle: eigene Darstellung

Probekörper n	Vorderseite Bereich D L1 / L2 [mm]	Vorderseite Bereich E L3 / L4 [mm]	Rückseite Bereich D L1 / L2 [mm]	Rückseite Bereich E L3 / L4 [mm]
G.Pk.1	0,121 / 0,15	- / -	0,146 / -	- / -
G.Pk.2	- / 4,50	- / -	0,791 / -	- / -
G.Pk.3	- / 5,39	- / -	- / 4,54	- / -
G.Pk.4	- / 5,12	- / -	- / 4,59	- / -
G.Pk.5	- / 4,78	- / -	- / 2,89	- / -
G.Pk.6	- / 3,26	- / -	- / 3,74	- / -
G.Pk.7	- / -	- / -	- / -	- / -
G.Pk.8	- / 5,09	- / -	- / 3,90	- / -
G.Pk.9	- / 5,01	- / -	- / 4,25	- / -
G.Pk.10	- / -	- / -	- / -	- / -
G.Pk.11	- / -	- / -	- / -	- / -
G.Pk.12	- / -	- / -	- / -	- / -
G.Pk.13	- / -	- / -	- / -	- / -

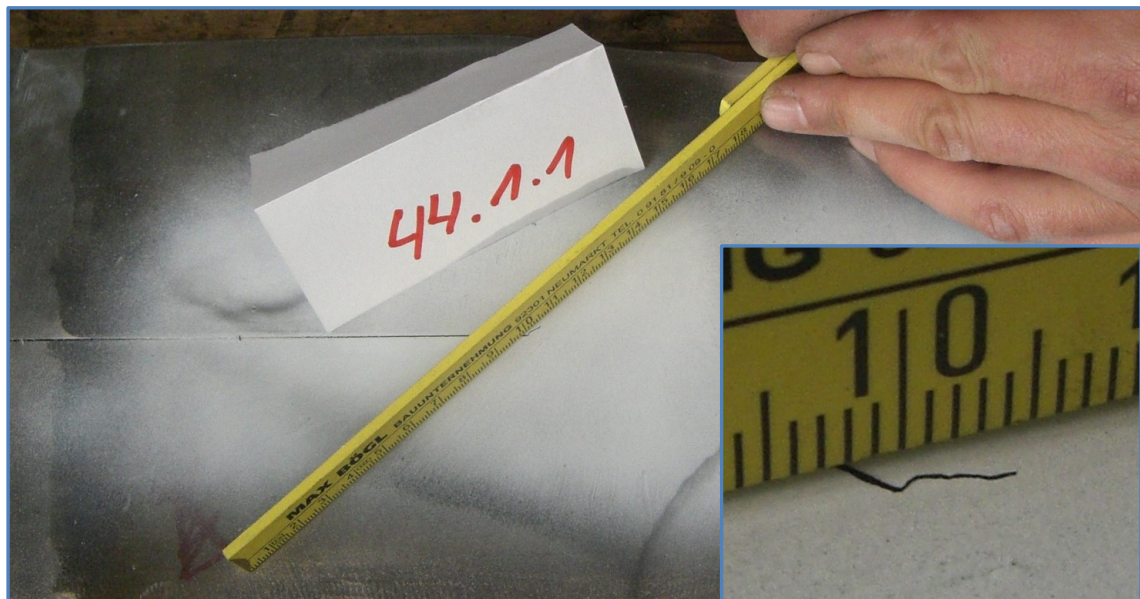


Abb. 37 Rissuntersuchung Großversuchskörper, MT Prüfung; Quelle: eigene Darstellung

4.6. Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Betrachtung des Musterstückes II

Die Herstellung des Musterstückes I erfolgte unter realistischen Baustellenbedingungen und kann mit dem Schweißvorgang und seinen Auswirkungen auf der Baustelle verglichen werden. Der Verfasser geht davon aus, dass im Musterstück I der Eigenspannungszustand vergleichbar mit dem Eigenspannungszustand im Bauwerk ist. Ein Indiz hierfür ist, dass durch die Schweißreihenfolge so gut wie kein Verzug des Bauteils vorhanden ist. Bei der Schweißnaht des Lamellenstoßes handelt es sich um eine Mehrlagenschweißnaht. Wie in Abs. 2.1 beschrieben sind die Zugeigenspannungen in einer Mehrlagenschweißung geringer als bei Einlagenschweißungen. Die Eigenspannungen in Dickenrichtung sind vernachlässigbar klein [8]. Somit ist nur der Eigenspannungsanteil in Nahtquerrichtung entscheidend. Beim Zerteilen des Musterstückes wurden nur die vernachlässigbar kleinen Eigenspannungen in Längsrichtung verändert. In Querrichtung sind die Eigenspannungen der Probekörper weitgehend unbeeinflusst.

Im Bereich des Wurzelpunktes der Stirnfugennaht sind Anrisse vorhanden. Die Anrisslänge variiert zwischen 0,0mm und 5,39mm. Da in diesem Bereich durch die Einbringung des Schweißgutes für die 2/3 X Naht ein erheblicher Wärmeeinfluss auch in der WEZ der Stirnfugennaht stattgefunden hat, wurde ein Musterstück II gefertigt. Bei diesem Musterstück II wurde nur die Stirnfugennaht geschweißt, und nach dem Schweißen wurde der Wurzelpunkt der Stirnfugennaht genau inspiziert und bewertet (siehe Abs. 5).

5. Schweißversuch - Stirnfugennaht, Musterstück II

Da die Stirnfugennaht, wie in Abs. 5.4 beschrieben, nur nach dem Schweißen der 2/3 X-Naht untersucht werden konnte, wurde ein Musterstück II gefertigt, bei dem nur die Stirnfugennaht geschweißt wurde. Für die Schweißung des zweiten Musterstückes wurde Blech aus der gleichen Tafel/Charge wie bei der ersten Schweißung verwendet (siehe Anhang A). Ziel dieser Versuchsschweißung war es, eine Aussage zum Entstehungszeitpunkt und zur Ursache der Anrisse am Wurzelpunkt der Stirnfugennaht treffen zu können. Die Stirnfugennaht wurde mit abweichenden Parametern aus der Schweißanweisung geschweißt.

5.1. Beschreibung des Schweißprozesses „Musterstück Stirnfugennaht“

Zwei 100mm dicke Bleche mit der Länge 660mm und der Breite 260mm wurden mit einer 10mm Fase als Schweißnahtvorbereitung auf der Längsseite zueinander parallel ausgerichtet und verspannt. Dieses Blechpaket wurde mit einem Brausebrenner auf 180°C vorgewärmt. Kontrolliert wurde die Vorwärmtemperatur an der Oberfläche mit einem geeichten Sekundenthermometer. Die Bleche wurden allseitig durch Heftnähte, die Lage der Heftnähte wurde dokumentiert, in der Position fixiert. Durch ein gleichmäßiges Abkühlen und Ausbreitung der Wärme im Bauteil sank die Vorwärmtemperatur auf 150°C ab. Beim Erreichen der 150°C wurden die drei Lagen der Stirnfugennaht in der Position PC mit einem Metallpulverfülldraht geschweißt. Der Verfasser und auch der ausführende Schweißer hatten die Vermutung, dass beim Schweißen der Stirnfugennaht des Musterstückes I von der Schweißanweisung abgewichen wurde. In der Schweißanweisung sind 200-220 Ampere Schweißstrom und 20-22 Volt Schweißspannung angegeben. Nach einer Schweißprobe mit den Schweißparametern 250 Ampere Schweißstrom und 25 Volt Schweißspannung wurde ein ähnliches Einbrandverhalten wie beim Musterstück I erzielt. Mit diesen Parametern wurde anschließend das Musterstück II geschweißt. Die Schweißgeschwindigkeit wurde bei beiden Musterstücken nicht dokumentiert. Die Zwischenlagentemperatur wurde mit einem geeichten Sekundenthermometer geprüft und lag zwischen 170-185°C.

5.2. Berechnung und Messung der $t_{8/5}$ Zeiten

Im SEW 088 [42] ist die Berechnung der Vorwärmtemperatur und die Berechnung und Messung der $t_{8/5}$ Zeiten beschrieben. Berechnet man diese mit den Werten der Werkstoffanalyse, (siehe Anhang A) erhält man folgende Werte.

Kohlenstoff Äquivalent CET [42]:

$$CET = C + \frac{Mn+Mo}{10} + \frac{Cr+Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \quad (27)$$

$$CET = 0,315$$

Wärmeeinbringung Q mit k= 0,8 (MAG-Schweißen) [42]

$$Q = k * \frac{U \cdot I}{v} * 10^{-3} \quad (28)$$

$$Q = 0,909$$

Mindestvorwärmtemperatur Tp mit HD=5 (Anhang A) und d=200mm

$$T_p = 700 * CET + 160 * \tanh\left(\frac{d}{35}\right) + 62 * HD^{0,35} \quad (29)$$

$$T_p = 137,304^{\circ}\text{C}$$

Abkühlzeit t_{8/5} mit F₃=0,9 [42]

$$t_{8/5} = (6700 - 5 * T_0) * Q * \left(\frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0} \right) * F_3 \quad (30)$$

$$t_{8/5} = 9,74 \text{ sec (Vorwärmtemperatur } 150^{\circ}\text{C)}$$

$$t_{8/5} = 6,13 \text{ sec (Vorwärmtemperatur } 137^{\circ}\text{C)}$$

Während des Schweißens wurde die Abkühltemperatur an dokumentierten Stellen durch Thermoelemente gemessen. Die Abkühlkurven wurden durch ein geeichtes Messgerät aufgezeichnet und sind in den Abb. 38, Abb. 39 und Abb. 40 für die einzelnen Lagen dargestellt. Zwischen 800°C und 500°C konnte bei allen Messpunkten die Abkühlzeit ausgewertet werden. Diese sind in der Tab. 9 dokumentiert.

Tab. 9 Auswertung der Abkühlzeiten; Quelle: eigenen Darstellung

t _{8/5} Zeiten				
	M1 [sec]	M2 [sec]	M3 [sec]	M4 [sec]
1. Lage	7,4	6,8	5	5,8
2. Lage	7,8	9,4	9,2	7,8
3. Lage	9,2	8,6	9	8,4

Bei einer Betrachtung der gemessenen und errechneten $t_{8/5}$ Zeiten (Vorwärmtemperatur 150°C) in der ersten Lage ist eine Differenz zwischen den Werten ersichtlich. Die gemessene Abkühlzeit war um einen Mittelwert von 3,49sec schneller als berechnet. Beim Schweißen der zweiten und dritten Lage war die Starttemperatur (Zwischenlagentemperatur) höher. Dies spiegelt sich in der langsamen Abkühlzeit wider. Die Werte in der ersten Schweißlage entwickeln eine eindeutige Tendenz zu den errechneten $t_{8/5}$ Werten für die errechnete Mindestvorwärmtemperatur 135°C.

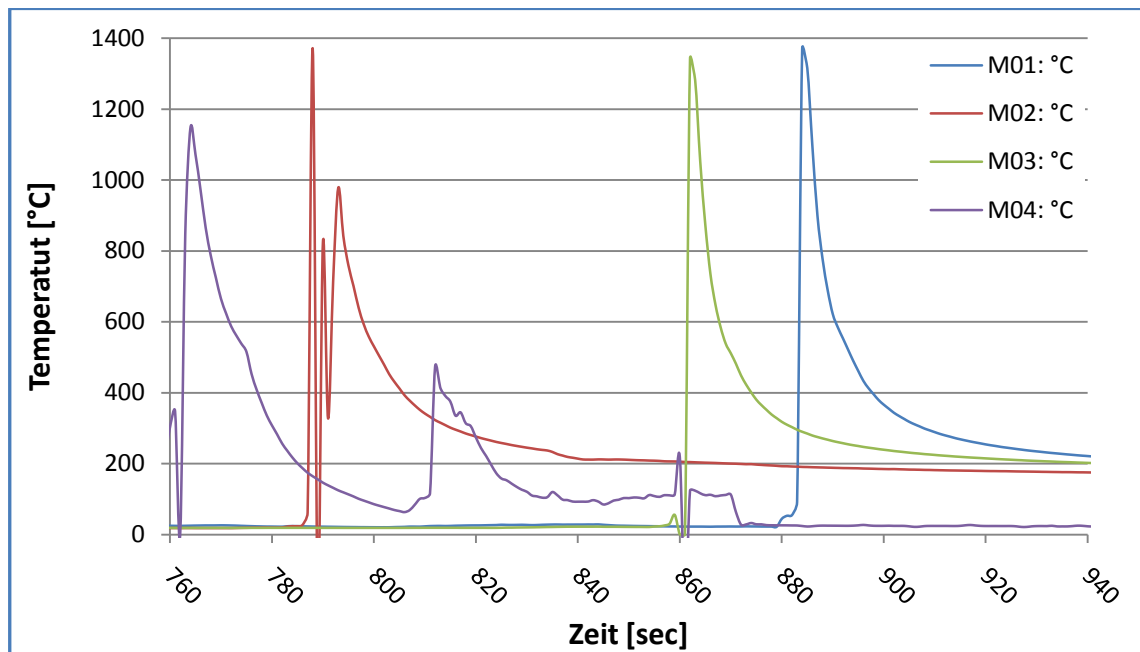


Abb. 38 Abkühlkurven 1.Lage; Quelle: eigene Darstellung

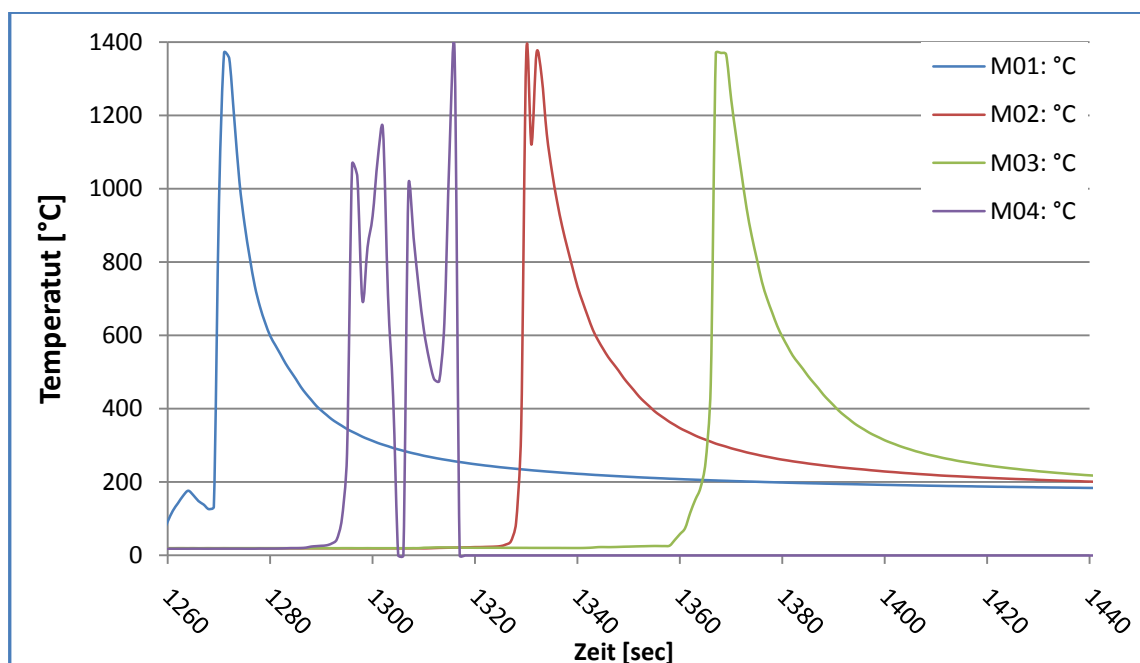


Abb. 39 Abkühlkurven 2.Lage; Quelle: eigene Darstellung

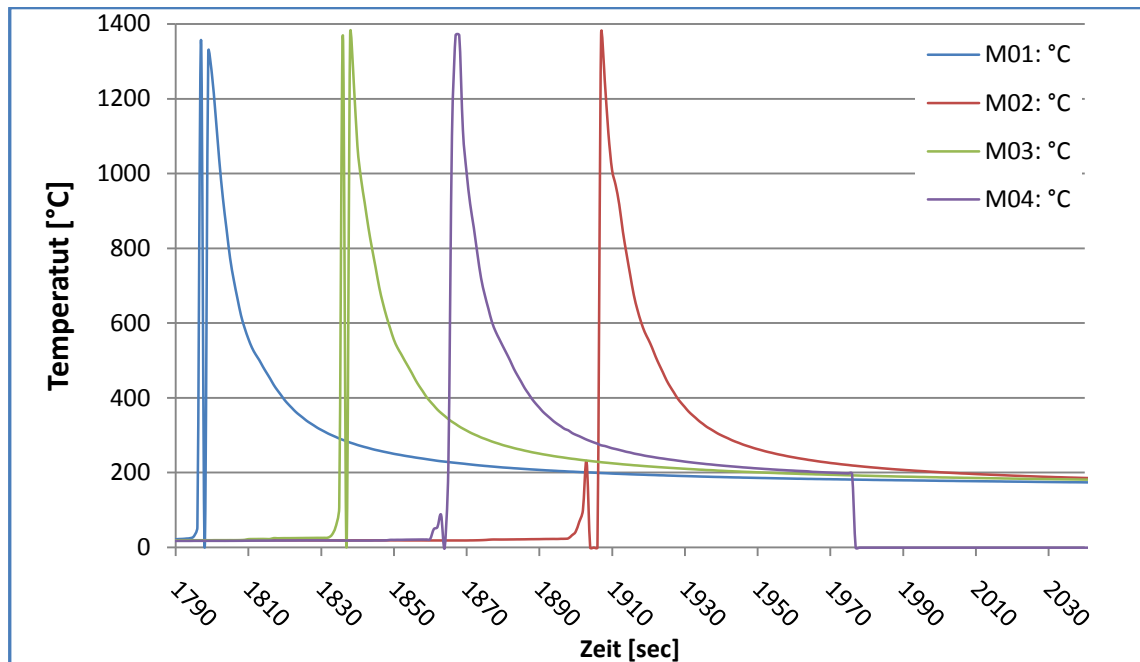


Abb. 40 Abkühlkurven 3. Lage; Quelle: eigene Darstellung

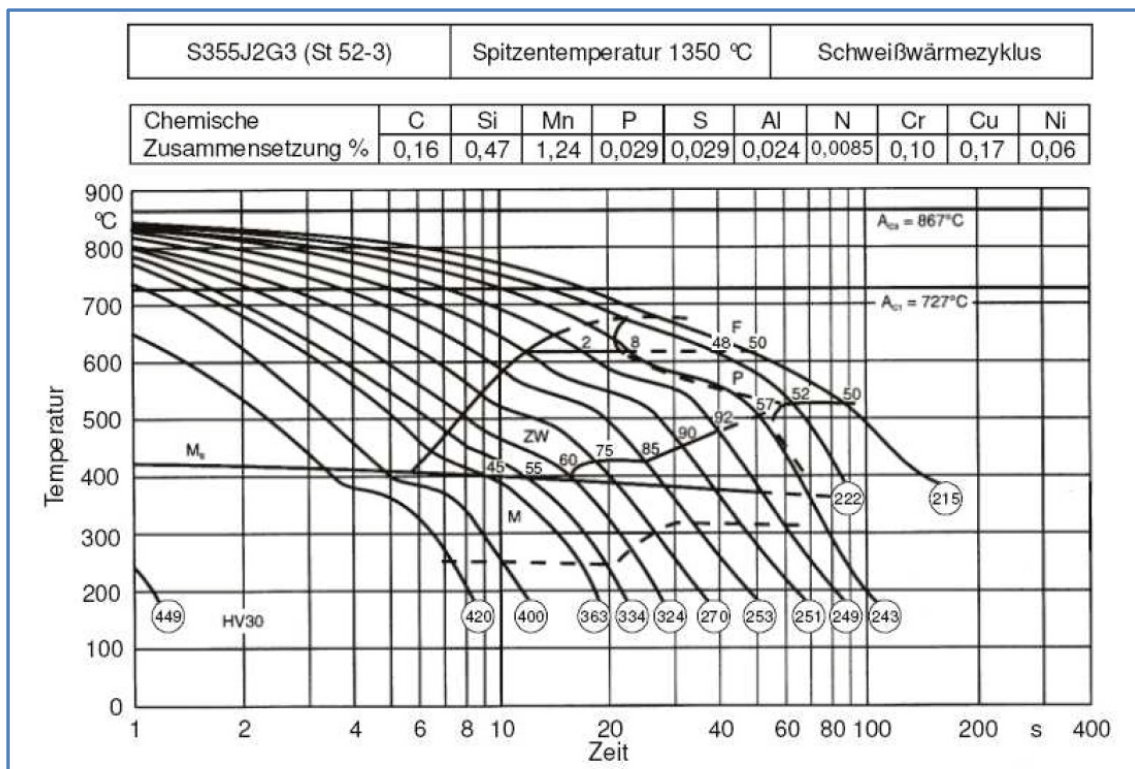


Abb. 41 ZTU-Diagramm; Quelle: [43]

Die Hersteller der Werkstoffe ermitteln zu ihren Legierungszusammensetzungen die ZTU Schaubilder. Zu der hier verwendeten Legierungszusammensetzung ist es dem Verfasser nicht gelungen, ein ZTU Schaubild vom Werkstofflieferanten zu erhalten. Das hier aufgeführte ZTU Schaubild wurde für eine ähnliche Legierung ermittelt und wird für die Ermittlung der HV30 Werte durch die gemessenen $t_{8/5}$ Zeiten verwendet.

Tab. 10 HV 30 Werte; Quelle: K.Kudla

Härtewerte ermittelt durch Tab. 9 und Abb. 41				
	M1 HV 30	M2 HV 30	M3 HV 30	M4 HV 30
1. Lage	324	334	363	334
2. Lage	324	324	324	324
3. Lage	324	324	324	324

5.3. Auswertung und Ergebnisse der Härtemessungen

Durch Sägen wurde der Versuchskörper so zerlegt, dass die entnommenen Proben keine Heftstellen und Temperaturmesspunkte enthalten. Die gestörten Bereiche wurden nicht weiter untersucht. In Abb. 42 ist die Probenentnahme dargestellt. An den entnommen 15mm starken Proben wurden Makroschliffe wie in Abs. 4.3 beschrieben durchgeführt. An den Proben zwei und fünf wurden die Härtewerte im Labor für Stahl- und Leichtbau der Hochschule München im Bereich der WEZ gemessen. Die gemessenen Werte und die Lage der Härtepunkte sind in Tab. 11 dokumentiert.



Abb. 42 Probenentnahme; Quelle: eigene Darstellung

Tab. 11 gemessene Härtewerte WEZ; Quelle: Labor für Stahl- und Leichtbau

Position	Probe 2 HV 10	Probe 5 HV 10
Decklage WEZ	345	338
Decklage WEZ	351	368
Decklage WEZ	332	373
Decklage WEZ	297	341
Decklage WEZ	366	313
Decklage WEZ	314	391
Wurzel WEZ	308	375
Wurzel WEZ	316	308
Wurzel WEZ	309	290
Wurzel WEZ	293	289
Wurzel WEZ	259	276
Wurzel WEZ	261	281

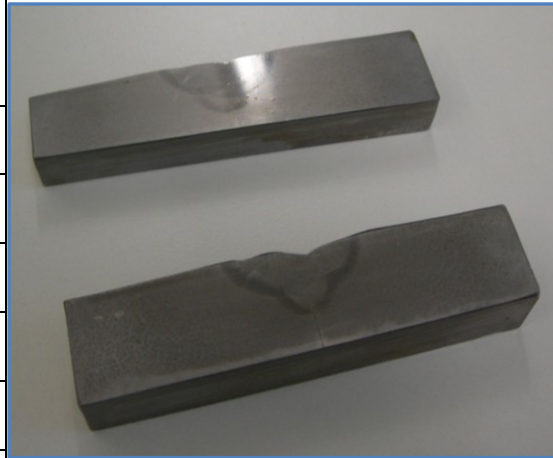
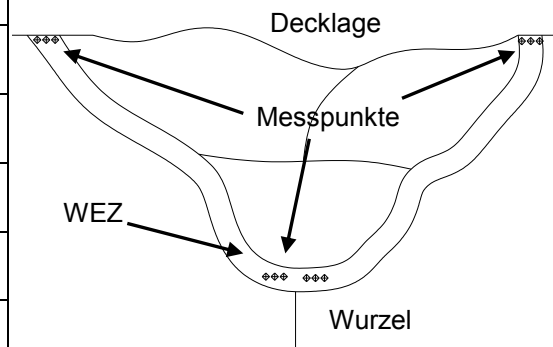


Abb. 43 Probe 2 & 5; Quelle: eigene Darstellung



In den Makroschliffbildern ist erkennbar, dass in der Musterschweißung II vergleichbare Einbrandverhältnisse wie in der Musterschweißung I erzielt wurden. Dies deutet darauf hin, dass die Anpassung der Schweißparameter den Werten entspricht, mit denen auch beim Musterstück I geschweißt wurde. Die Verhältnisse aus dem Musterstück I sind somit mit dem Musterstück II vergleichbar und die Ergebnisse weitgehend übertragbar. In der Stirnfugennaht wurden an den signifikanten Punkten die Härtewerte in der WEZ gemessen. An der Oberkante der Decklage wurde rechts und links in der WEZ eine Härtereihe gemessen. An der Blechtrennung - diese Stelle war bisher Ausgangspunkt der Rissindizierung - wurde rechts und links davon eine Härtereihe gemessen.

Wie zu erwarten fallen die Härtewerte in der Decklage höher aus, als die Härtewerte in der Wurzel. Dieser Härteverlauf ist typisch für eine Mehrlagenschweißung und erklärt sich durch die Wärmebehandlung, die durch das Überschweißen stattfindet. Wie genau die Werte mit den abgelesenen Werten aus den $t_{8/5}$ Zeiten verglichen werden können ist nach Meinung des Verfassers diskussionswürdig, da es sich bei den Werten aus dem ZTU Schaubild um HV30 Werte handelt und die gemessenen Werte als

HV10 ermittelt wurden. Es ist bekannt, dass durch HV30 Werte ein größerer Bereich in der Messung abgedeckt wird als bei der Messung mit HV10. Der gemessene Wert mit HV30 fällt somit kleiner aus als der gemessene Wert mit HV10.

5.4. Mikroskopische Betrachtung

Nach dem in Abs. 4.4 beschriebenen Verfahren wurden an den entnommenen Probekörpern ebenfalls mikroskopische Betrachtungen durchgeführt. Die mikroskopische Betrachtung an den geätzten Proben zeigt an einigen Proben die gleiche Rissindizierung wie an den Proben aus dem Musterstück II, die in Abs. 4.4 und 4.5 dokumentiert sind; die Anrisslängen sind entscheidend kürzer. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Tab. 12 dokumentiert.

Tab. 12 Ergebnisse makroskopischen Betrachtung; Quelle: eigenen Darstellung

Probe	oberes Blech [mm]		unteres Blech [mm]	
	vorn	hinten	vorn	hinten
P1.1	-	0,3	-	0,2
P2.1	0,3	-	0,1	-
P3.1	0,1	-	0,1	-
P4.1	-	-	-	-
P5.1	0,2	-	-	-
P6.1	0,2	-	0,4	-
P7.1	-	-	-	-
P8.1	-	0,3	-	-



Abb. 44 Probe 8; Quelle: eigene Darstellung

5.5. Fazit aus den Untersuchungen am Musterstück II

Durch die erzielten Ergebnisse ergeben sich mehrere Möglichkeiten, die Rissindizierung am Wurzelpunkt der Stirnfugennaht zu erklären. Bei den festgestellten Anrissen scheint es sich um Kaltrisse zu handeln, welche durch ein zu schnelles Abkühlverhalten am Wurzelpunkt entstanden sind. Die schnelle Abkühlzeit aus der Musterschweißung II deutet darauf hin. Beim Nichteinhalten der Vorwärmtemperatur fällt die Abkühlzeit noch kürzer aus, und die Härtewerte steigen weiter an. Evtl. war dies bei der Musterschweißung I der Fall. Eine weitere Ursache könnte in der Schweißgeschwindigkeit liegen, da bei einer höheren Schweißgeschwindigkeit weniger Energie eingebracht wird als bei einer niedrigeren. Das Anrissverhalten wird mit großer Sicherheit auch durch die Geometrie beeinflusst. Die Größe der Anrisse in Musterstück I könnte darauf hindeuten, dass beim Schweißen der 2/3 X-Naht der Riss durch Winkelschrumpfungen aufgeht und anwächst. Desweiteren hat mit großer Wahrscheinlichkeit auch der Spalt zwischen den beiden Blechen einen Einfluss auf das Anrissverhalten. Dieses Phänomen kann nur durch eine weitere Anzahl von Schweißversuchen geklärt werden und wurde an dieser Stelle nicht weiter untersucht. Welchen Einfluss der Anriss auf die Ermüdungsfestigkeit hat, wird in den folgenden Abschnitten untersucht.

6. Schwingversuche Großversuchskörper

Durch die Großversuche wurde die Schwingfestigkeit für den Lamellenstoß mit Dickensprung (190mm/180mm) aus der Brücke Lochkov über dem Pfeiler 5 ermittelt. Dreizehn Ermüdungsversuche wurden vom Labor für Stahl- und Leichtbau der Hochschule München unter Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. Ö.Bucak in Zusammenarbeit mit dem Verfasser durchgeführt. Als Anhang C ist der Versuchsbericht -geschrieben vom Labor für Stahl- und Leichtbau- den hier beschriebenen Versuchen angefügt. Die Versuche wurden an Versuchskörpern aus dem Musterstück I. durchgeführt.

6.1. Versuchskörper

Die Versuchskörper wurden nach dem in Abs. 4.3 beschriebenen Verfahren aus dem Musterstück entnommen. An diese 15mm starken Platten wurden Anschweißen- den angeschweißt, um die Kraft in den eigentlichen Versuchskörper einzuleiten. (Abb. 45) Die Anschweißenden sind 30mm stark und wurden durch eine X-Naht an die Versuchskörper unter Verwendung von An- und Auslaufstücken angeschweißt. Nur die Schweißnähte dieser Stumpfstöße wurden kerbfrei beschliffen. Mittig im Versuchskörper liegt die Schweißnaht des Lamellenstoßes. Die Versuche wurden an der ungeschliffenen Schweißnaht des Lamellenstoßes durchgeführt.

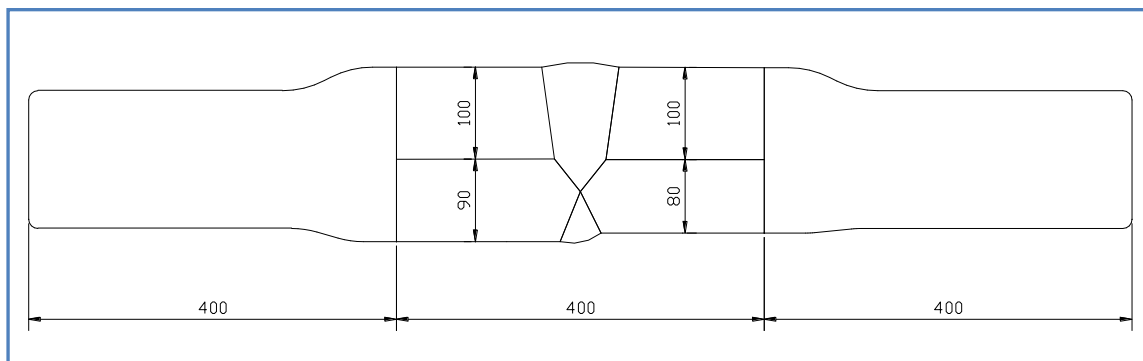


Abb. 45 Großversuchskörper; Quelle: eigene Darstellung

Die Form der Anschweißenden war so ausgebildet, dass die Kraft pro Seite zentrisch in das einzelne Blechpaket eingeleitet wurde. Durch die Schweißnaht wird ein Blechversatz von 10mm ausgeglichen, und im Versuchskörper entsteht durch diesen Dickensprung ein Kraftverlauf, der im Vorfeld der Versuche nicht ermittelt wurde. Die für die Versuche festgelegte Spannungsschwingbreite wurde an der maßgebenden Querschnittfläche $A = 180\text{mm} \times 15\text{mm} = 2700\text{mm}^2$ ermittelt.

6.2. Versuchsaufbau

Eingesetzt wurden die Versuchskörper in eine Flachprobeneinspannung, die die Prüfkkräfte durch Reibschluss auf die Probekörper überträgt. Wie in Abb. 46 zu erkennen, wirkt die Einspannung auf die Anschweißenden, und von dort aus wird die Kraft in die Schweißnaht des Lamellenstoßes eingeleitet. Durch Ausgleichsbleche wurde der Versuchsaufbau ausgerichtet, so dass eine momentenfreie Krafteinleitung in die Versuchskörper gewährleistet werden konnte.

Als erstes Abschaltkriterium für die Schwingversuche wurde eine Verformungszunahme von $\Delta s = 0,05\text{mm}$ festgelegt. Diese Verformungszunahme wurde als erster erkennbarer Anriss definiert. Die Versuche wurden durch eine auf der Widerlagerseite angebrachte Kraftmessdose kraftgesteuert gefahren. Durch diesen Versuchsaufbau wurden dynamisch Effekte in der Kraftsteuerung ausgeschlossen. Die kraftgesteuerte Regelung garantiert eine konstante Lastamplitude im Prüfkörper auch bei einer Steifigkeitsänderung und einem wachsendem Anriss. Die gefahrene Prüffrequenz betrug ca. 34Hz. Bei einer Verformungszunahme wurden die Versuche erneut angefahren und die Lastwechselzahl notiert, um das Risswachstum zu dokumentieren. Bei einer Querschnittsschwächung von 50% des Gesamtquerschnittes wurden die Versuche abgebrochen. Als Versuchseinrichtung diente ein 600 kN Horizontal-Hochfrequenzpulsler der Marke Schenck (Abb. 46). Durch das Limit der Prüfkkräfte wurde eine maximale Spannungsschwingbreite von $\Delta\sigma = 180\text{N/mm}^2$ festgelegt. Alle Versuche wurden bei einem konstanten Spannungsverhältnis $R = 0,1$ durchgeführt.

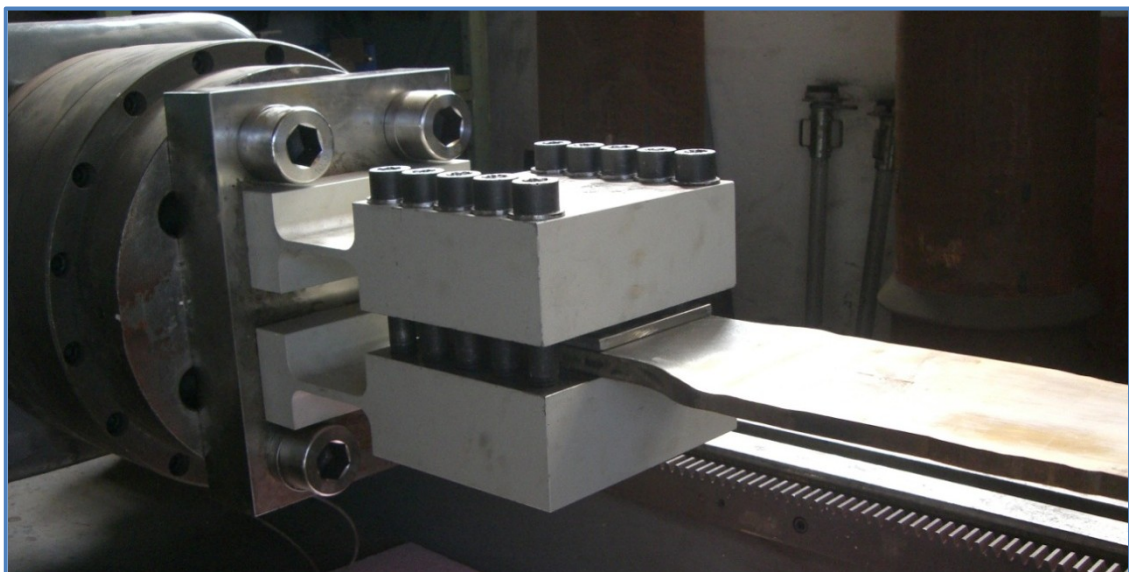


Abb. 46 Flachprobeneinspannung Großversuche; Quelle: Labor für Stahl- und Leichtbau

6.3. Versuchsergebnisse

In der nachfolgenden Tab. 13 sind die erreichten Schwingspiele bei der vorher festgelegten Spannungsschwingbreite $[\Delta\sigma]$ bis zu einer Verformungszunahme $\Delta s = 0,05\text{mm}$ dokumentiert. In den Tab. 14 ist die Anzahl der Schwingspiele bis zum Versuchsabbruch dargestellt.

Tab. 13 Ergebnisse Großversuche, $\Delta s = 0,05\text{mm}$; Quelle: Anlage C

Nr	Spannungs- schwingbreite [N/mm ²]	Schwingspiele [-]	Beobachtung Stirnfugennaht
			Position Versagensanriss (Abb. 36)
			Bemerkung
G.Pk1	133	836.497	kein beobachtetes Risswachstum
			Versagen im Bereich der Lasteinleitung
			-
G.Pk2	133	496.077	kein beobachtetes Risswachstum
			Versagen Schweißnahtfuß X-Naht (Bereich H)
			-
G.Pk3	100	6.000.000	kein beobachtetes Risswachstum
			Versagen Schweißnahtfuß X-Naht (Bereich H)
			Durchläufer
G.Pk3	133	1.018.811	kein beobachtetes Risswachstum
			Versagen Schweißnahtfuß X-Naht (Bereich H)
			hochgesetzter Durchläufer, schlagartiges Versagen
G.Pk4	150	377.412	kein beobachtetes Risswachstum
			Versagen Schweißnahtfuß X-Naht (Bereich H)
			-
G.Pk5	150	546.343	keine beobachtetes Risswachstum
			Versagen Schweißnahtfuß X-Naht
			-
G.Pk6	100	890.148	kein beobachtetes Risswachstum
			vermutliches Versagen Schweißnahtfuß X-Naht (Bereich H)
			Ausreißer
G.Pk7	180	143.986	keine beobachtetes Risswachstum
			Versagen Schweißnahtfuß X-Naht
			-
G.Pk8	180	220.711	kein beobachtetes Risswachstum
			Versagen Schweißnahtfuß X-Naht
			-
G.Pk9	120	203.275	kein beobachtetes Risswachstum
			vermutliches Versagen Schweißnahtfuß X-Naht (Bereich H)
			Ausreißer
G.Pk10	120	607.877	kein beobachtetes Risswachstum
			Versagen Schweißnahtfuß X-Naht (Bereich H)
			-
G.Pk11	120	543.835	keine beobachtetes Risswachstum
			Versagen Schweißnahtfuß X-Naht (Bereich H)
			-
G.Pk12	100	2.183.501	keine beobachtetes Risswachstum
			Versagen Schweißnahtfuß X-Naht (Bereich H)
			-
G.Pk13	165	255.036	keine beobachtetes Risswachstum
			Versagen Schweißnahtfuß X-Naht (Bereich H)
			-

Tab. 14 Ergebnisse Großversuche, Versuchsabbruch; Quelle: Anlage C

Nr	Spannungs- schwingbreite [N/mm ²]	Schwingspiele [-]	Beobachtung Stirnfugennaht
			Position Versagensanriss (Abb. 36)
			Bemerkung
G.Pk1	133	1.158.024	kein beobachtetes Risswachstum
			Versagen im Bereich der Lasteinleitung
			-
G.Pk2	133	585.189	kein beobachtetes Risswachstum
			Versagen Schweißnahtfuß X-Naht (Bereich H)
			-
G.Pk3	100	6.000.000	kein beobachtetes Risswachstum
			Versagen Schweißnahtfuß X-Naht (Bereich H)
			Durchläufer
G.Pk3	133	1.018.811	kein beobachtetes Risswachstum
			Versagen Schweißnahtfuß X-Naht (Bereich H)
			hochgesetzter Durchläufer, schlagartiges Versagen
G.Pk4	150	416.236	kein beobachtetes Risswachstum
			Versagen Schweißnahtfuß X-Naht (Bereich H)
			-
G.Pk5	150	586.503	kein beobachtetes Risswachstum
			Versagen Schweißnahtfuß X-Naht
			-
G.Pk6	100	890.148	keine beobachtetes Risswachstum
			vermutliches Versagen Schweißnahtfuß X-Naht (Bereich H)
			Ausreißer
G.Pk7	180	149.284	kein beobachtetes Risswachstum
			Versagen Schweißnahtfuß X-Naht
			-
G.Pk8	180	223.084	kein beobachtetes Risswachstum
			Versagen Schweißnahtfuß X-Naht
			-
G.Pk9	120	249.174	kein beobachtetes Risswachstum
			vermutliches Versagen Schweißnahtfuß X-Naht (Bereich H)
			Ausreißer
G.Pk10	120	659.757	kein beobachtetes Risswachstum
			Versagen Schweißnahtfuß X-Naht (Bereich H)
			-
G.Pk11	120	1.244.958	kein beobachtetes Risswachstum
			Versagen Schweißnahtfuß X-Naht (Bereich H)
			-
G.Pk12	100	2.306.071	kein beobachtetes Risswachstum
			Versagen Schweißnahtfuß X-Naht (Bereich H)
			-
G.Pk13	165	285.154	kein beobachtetes Risswachstum
			Versagen Schweißnahtfuß X-Naht (Bereich H)
			-

Bei einer Betrachtung der hier vorliegenden Ergebnisse fallen besonders die Lastwechselzahlen der Versuchskörper G.Pk3, G.Pk6 und G.Pk9 auf. Der Versuch des Versuchskörpers G.Pk.3 mit $\Delta\sigma = 100 \text{ N/mm}^2$ wurde bei 6.000.000 Lastwechseln abgebrochen, und ein neuer Versuch mit demselben Versuchskörper wurde bei $\Delta\sigma = 133 \text{ N/mm}^2$ gestartet. Beim Erreichen von 1.018.811 Schwingspielen kam es zu einem schlagartigen Versagen des Probekörpers. Auch bei genauer Betrachtung der Bruchfläche (Abb. 49) lassen sich keine Rückschlüsse auf das außergewöhnliche Versagen des Versuchskörpers ziehen. Ob die Festlegung der Verformungsgrenze $\Delta s = 0,01 \text{ mm}$ eingehalten wurde, konnte nach dem schlagartigen Versuchsabbruch nicht nachvollzogen werden. In der späteren Auswertung wird der hochgesetzte Durchläufer als Ausreißer bewertet.

Ebenso konnten die ungewöhnlich Ergebnisse der Probekörper G.Pk.6 und G.Pk.9 nicht geklärt werden. Das Versagen dieser Versuchskörper startet wie bei allen anderen auch im Bereich H. Auch bei der Betrachtung der Bruchfläche (Abb. 52) sind keine Besonderheiten auffällig. Diese Proben wurden nach den Ermüdungsversuchen nach dem in Abb. 50 dargestellten Verfahren entnommen. Zum Vergleich dieser Probe wurden auch Proben aus G.Pk.8 und G.Pk.10 entnommen. Auch diese Proben weisen die gleiche Bruchstruktur auf. Die G.Pk9 wurde ebenfalls als Ausreißer bewertet.

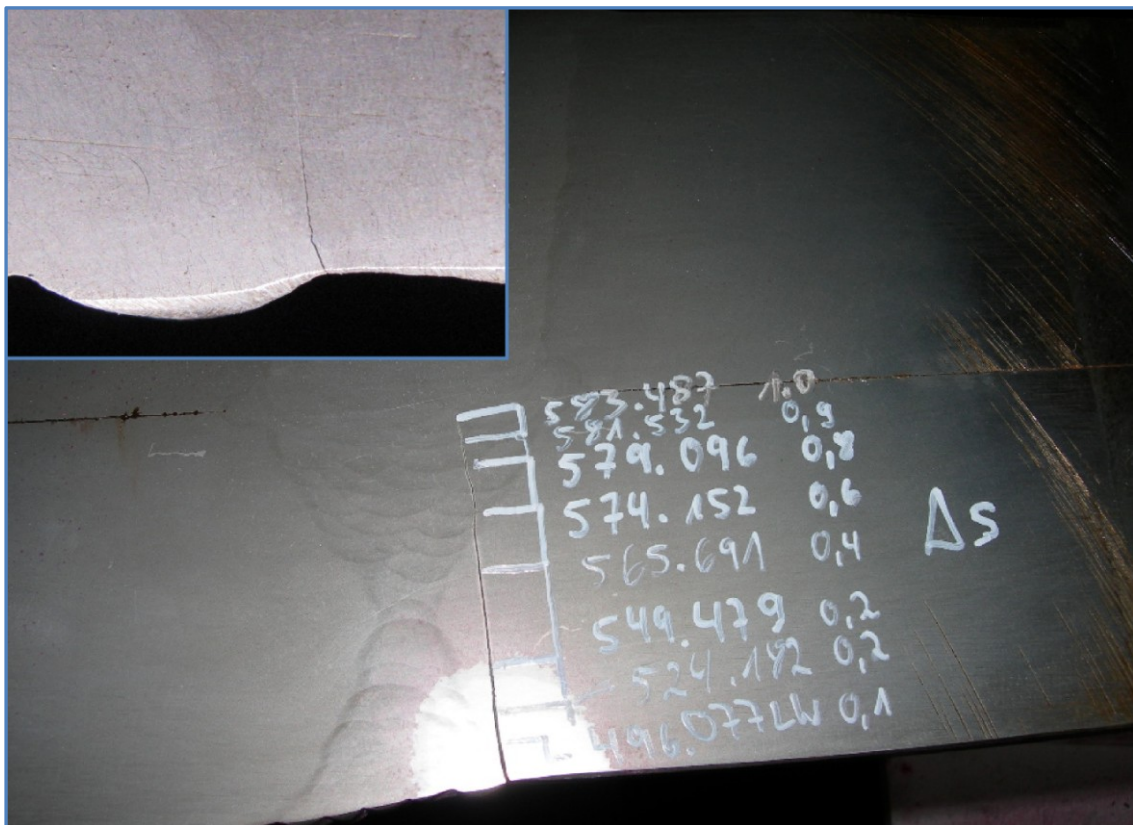


Abb. 47 G.Pk2, Rissfortschritt und Vergrößerung des Anrissbereiches; Quelle: Labor für Stahl- und Leichtbau

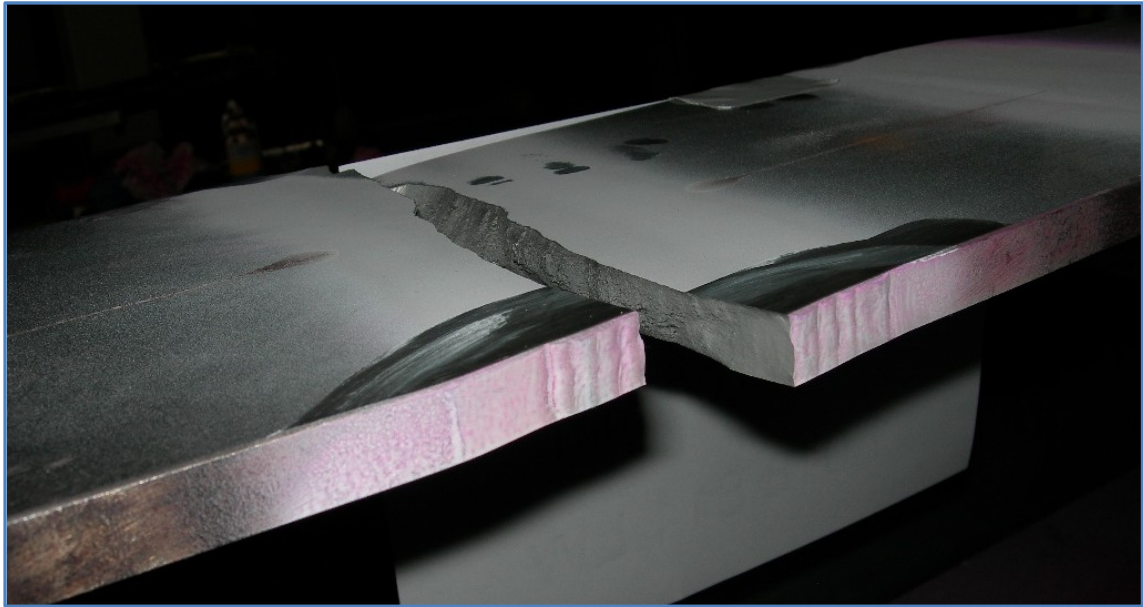


Abb. 48 G.Pk6, schlagartiges Versagen; Quelle: Labor für Stahl- und Leichtbau



Abb. 49 G.Pk6, Bruchflächen; Quelle: Labor für Stahl- und Leichtbau

An einigen Versuchskörpern wurden vor den Ermüdungsversuchen relativ große Anrisse im Wurzelpunkt der Stirnfugennaht festgestellt. Diese sind im Abs. 4.4 dokumentiert. Während der Versuche wurde dieser Bereich genau beobachtet. Es konnte kein Risszuwachs unter Ermüdungsbeanspruchung festgestellt werden. Um diese visuelle Betrachtung zu stützen, wurde nach dem in Abb. 50 dargestellten Schema die Probe b entnommen. Diese Probe b wurde durch spannende Bearbeitung so vorbereitet, dass durch eine Biegebeanspruchung der Anriss und der restliche Werkstoff durch einen Verformungsbruch geöffnet werden konnte. In der Abb. 51 ist die aufgebrochene Probe b dargestellt. Die Bruchfläche A ist stark oxidiert und bestätigt den vorher erkannten Anriss. Durch die stark oxidierte Bruchfläche lässt sich rückschließen, dass dieser Anriss während des Schweißens entstanden ist. Die helle Bruchfläche ist durch den Gewaltbruch entstanden. Bei einer Betrachtung durch eine Lupe konnten keine Anzeichen erkannt werden, die auf einen Risszuwachs unter Ermüdungsbelastung hindeuten. Auch hier wurden zum Vergleich Proben aus mehreren Versuchskörpern entnommen (G.Pk 8, G.Pk 9, G.Pk 10). Auch diese Proben weisen die gleiche Bruchfläche auf.

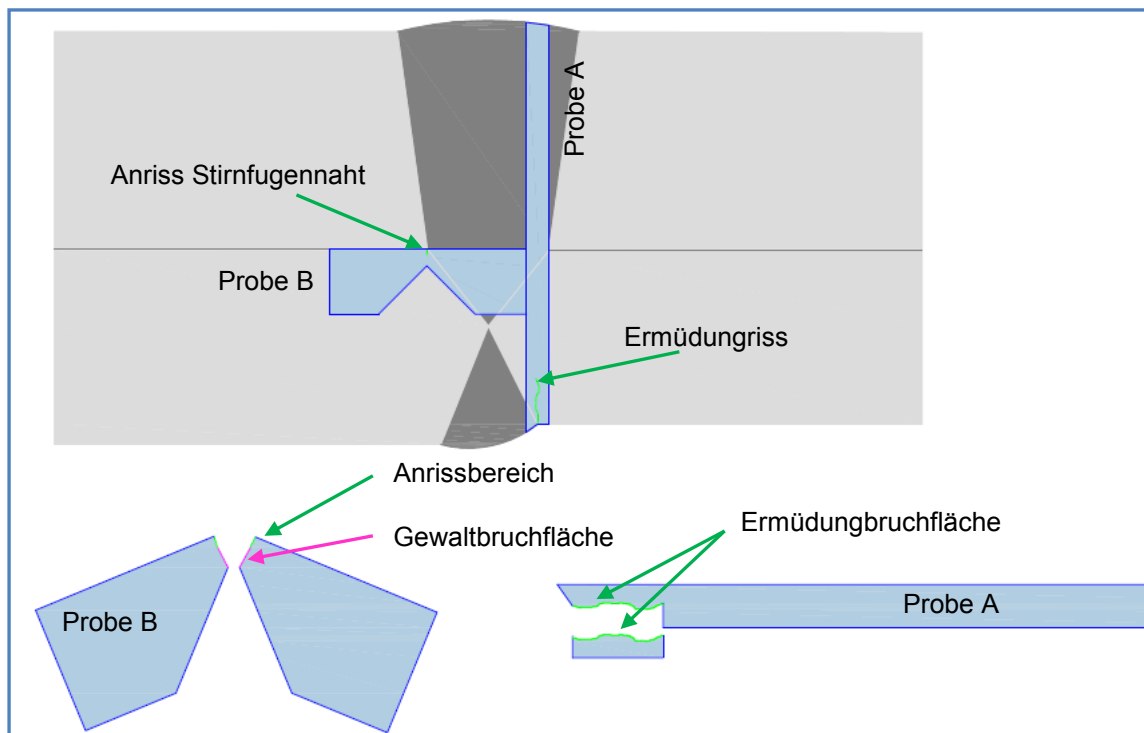


Abb. 50 Entnahmeschema Bruchflächen; Quelle: eigene Darstellung

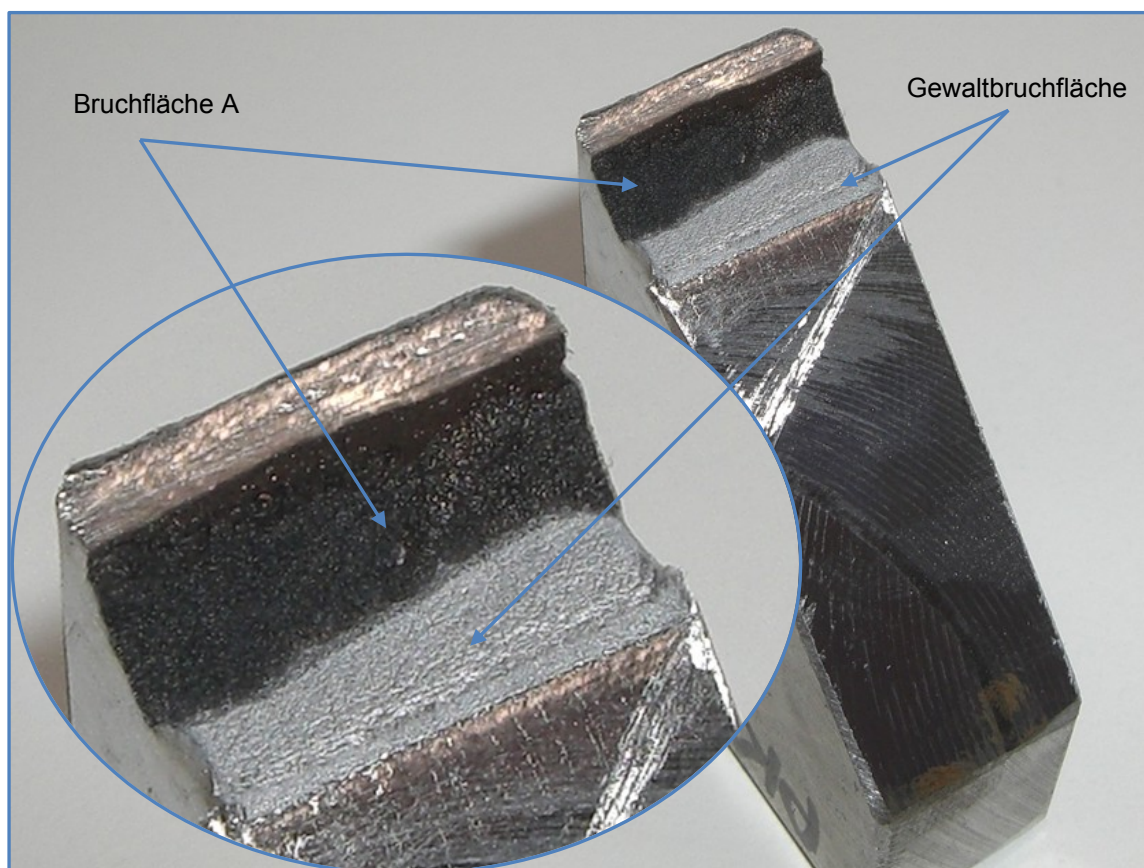


Abb. 51 G.Pk 8, Probe B; Quelle: eigene Darstellung

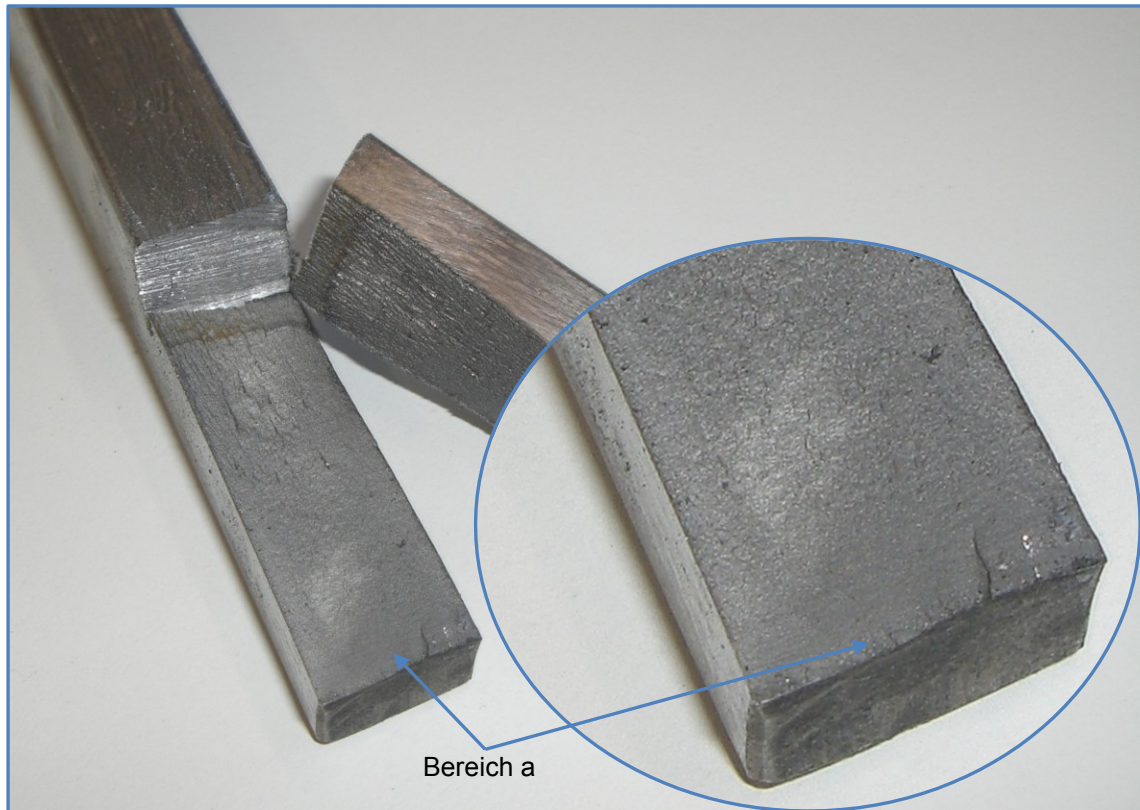
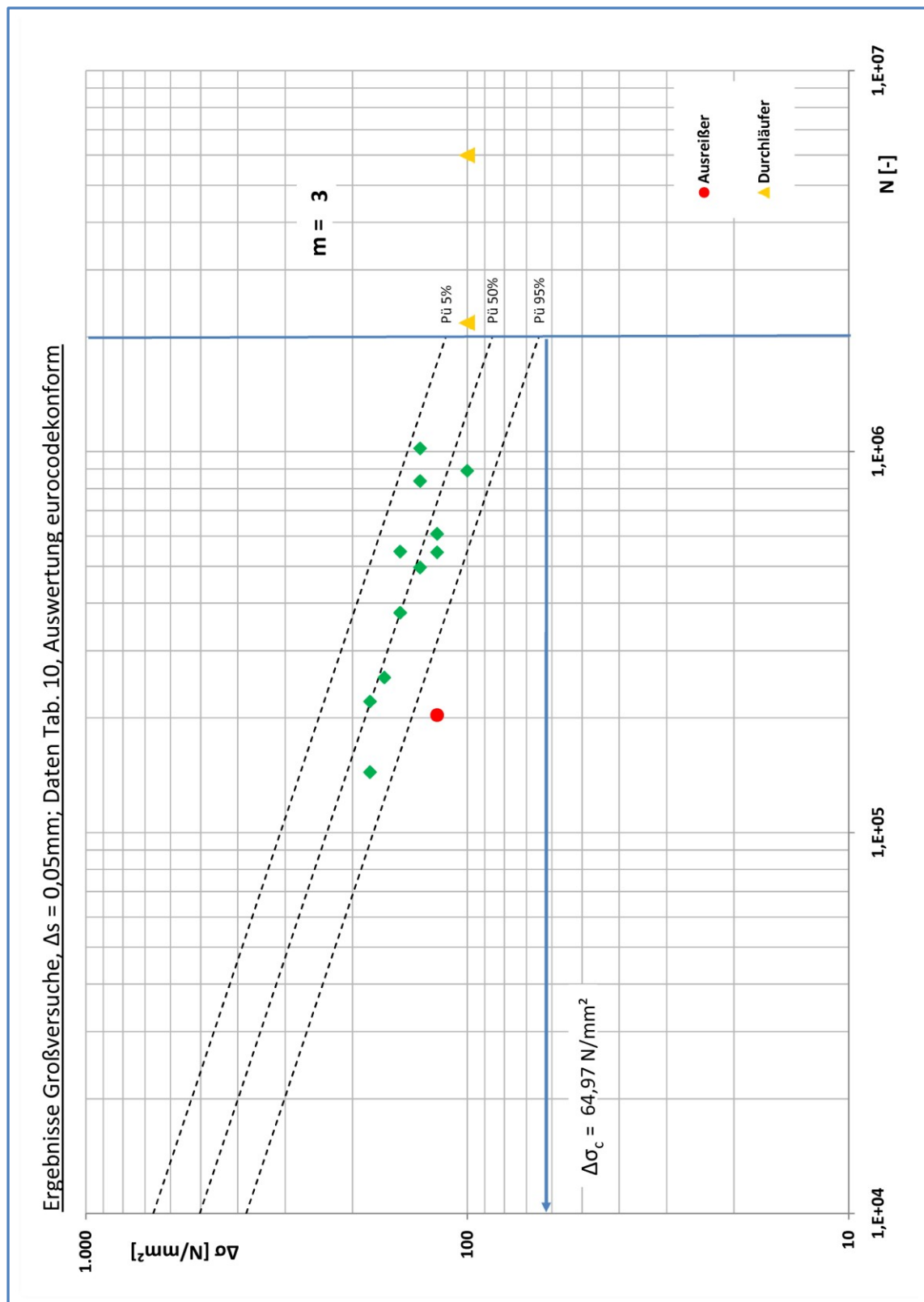
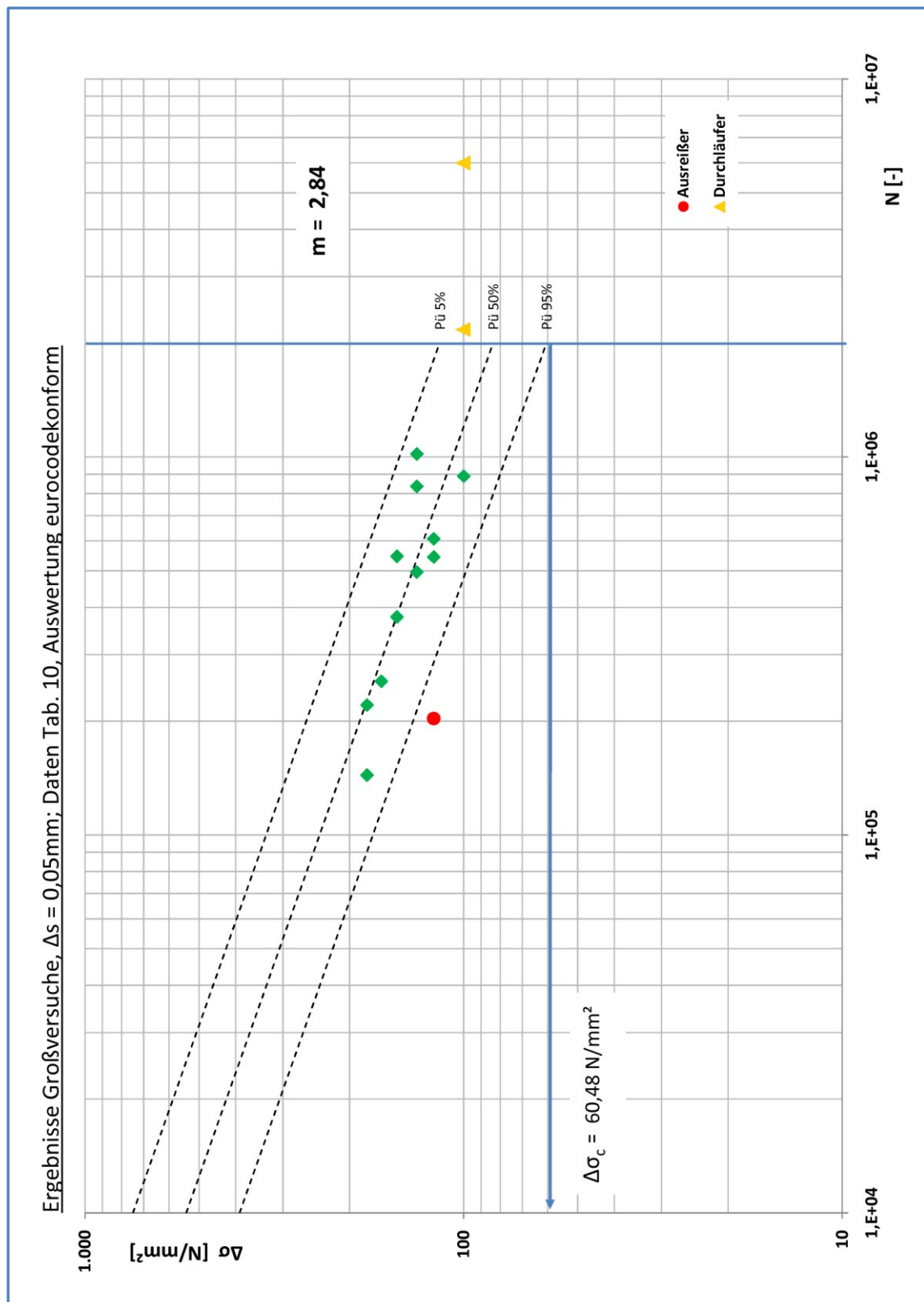
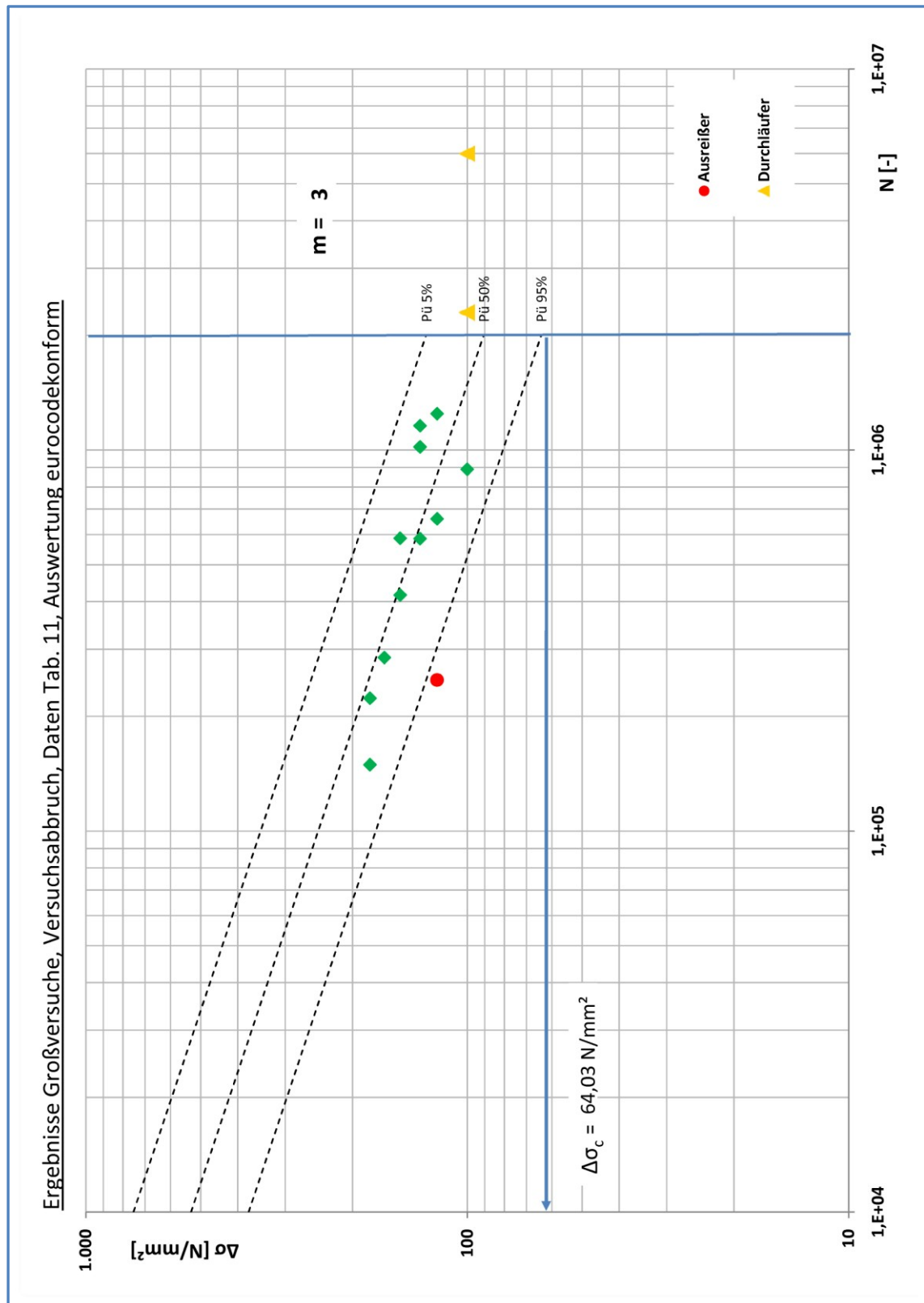


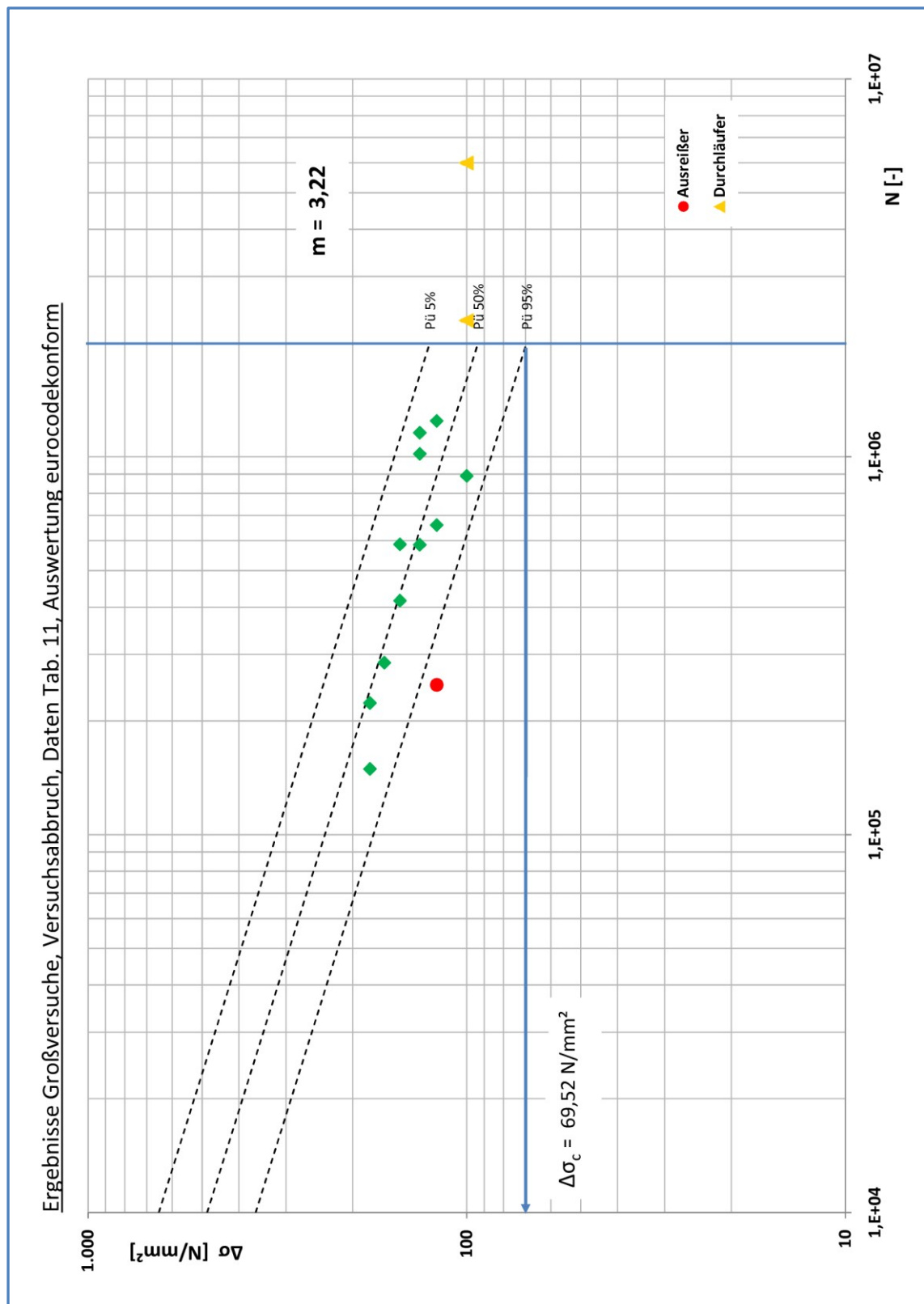
Abb. 52 G.Pk 9, Probe A; Quelle: eigene Darstellung

Die Versuchsergebnisse wurden nach dem in Abs. 2.2 beschriebenen Verfahren ausgewertet. Die nachfolgenden Diagramme (Abb. 53 - Abb. 56) stellen die Ergebnisse abhängig von der Verformungszunahme Δs dar. Es sind jeweils eine Auswertung mit der variablen Steigung und der festgelegten Steigung $m = 3$ für die Zuordnung zu den Wöhlerkurven nach DIN EN 1993-1-9 [3] dargestellt. Der maßgebende Bemessungswert $\Delta \sigma_c$ wurde bei einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 95% ermittelt. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse erfolgt in Abs. 9.

Abb. 53 Wöhlerkurve Großversuche, $\Delta s = 0,05$, $m=3$; Quelle: eigene Darstellung

Abb. 54 Wöhlerkurve Großversuche, $\Delta s = 0,05$, $m = 3,26$; Quelle: eigene Darstellung

Abb. 55 Wöhlerkurve Großversuche, Versuchsabbruch, $m=3$; Quelle: eigene Darstellung

Abb. 56 Wöhlerkurve Großversuche, Versuchsabbruch, $m=3,48$; Quelle: eigene Darstellung

7. Schwingversuche Kleinversuchskörper

Die Kleinversuche wurden durchgeführt, um eine Aussage über die Kerbwirkung der in Abs. 4 festgestellten Rissindizierung am Wurzelpunkt der Stirnfugennaht unter Ermüdungsbelastung treffen zu können. Im Verlauf dieser Versuche ergaben sich drei Versuchsaufbauten. Diese wurden modifiziert, bis sich das Versagen der Versuchskörper an der Stirnfugennaht einstellt. Alle Versuche wurden mit Versuchskörpern aus dem Musterstück I durchgeführt.

7.1. Versuchsaufbau

Sämtliche Kleinversuche wurden auf der hauseigenen Hydropulsanlage der Firmengruppe Max Bögl durchgeführt (siehe Abb. 57). Es wurden ein servohydraulischer Prüfzylinder und eine Steuerung der Firma Instron verwendet.

Technische Daten Prüfzylinder:

Prüfkraft	$\pm 250\text{kN}$
Prüffrequenz	0 bis 25 Hz
Prüfweg	$\pm 250\text{mm}$

Die Versuche wurden mit den Versuchskörperaufnahmen A und B durchgeführt. Zwischen der oberen Prüfkörperaufnahme und dem Prüfzylinder ist eine Kraftmessdose eingebaut. Um evtl. dynamische Effekte, die auf die obere Kraftmessdose wirken, sichtbar zu machen, wurde auf der unteren Seite zwischen Spannbett und unterer Prüfkörperaufnahme eine zweite Kraftmessdose eingebaut. Die Messdaten der oberen und unteren Kraftmessdose wurden miteinander abgeglichen.

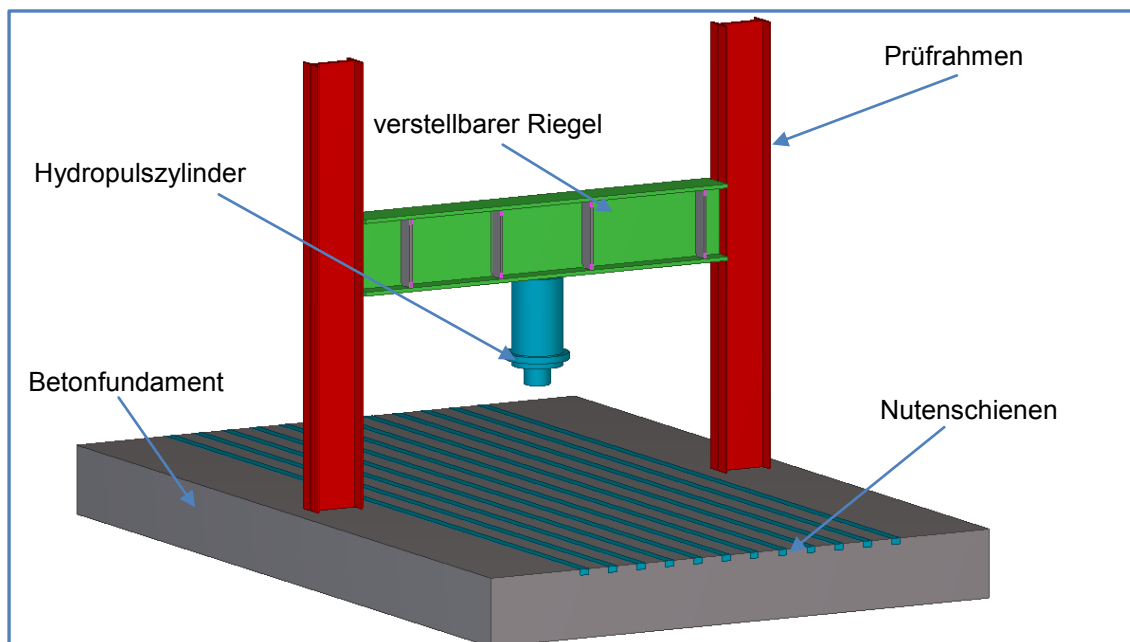


Abb. 57 Hauseigene Hydropulsanlage der Firmengruppe Max Bögl; Quelle: eigene Darstellung

Als erstes Abbruchkriterium für die Schwingversuche wurde eine Wegzunahme von $\Delta s = 0,05\text{mm}$ oder der Prüfkörperbruch festgelegt. Die Versuche wurden kraftgesteuert gefahren. Diese Regelung garantiert eine konstante Lastamplitude im Prüfkörper auch bei einer Steifigkeitsänderung und einem wachsenden Anriss. Sämtliche Versuchskörper dieser Versuchsserie wurden bei einer Prüffrequenz von 5-8 Hz bis zum Bruch gefahren. Alle Versuche wurden bei einem konstanten Spannungsverhältnis $R = 0,1$ durchgeführt.

7.2. Versuchskörper A, Kleinversuche

Die Versuchskörper wurden nach dem in Abs. 4.3 beschriebenen Verfahren aus dem Musterstück I entnommen. Der Versuchsaufbau A wurde so konstruiert, dass an den Versuchskörpern keine weiteren Schweißarbeiten durchgeführt werden mussten. Die Schweißnaht des Lamellenstoßes liegt in der Mitte des Prüfkörpers, die Blechtrennung - Stirnfugennaht - liegt auf der Symmetrieachse des Versuchskörpers (siehe Abb. 58). Die für die Versuche festgelegte Spannungsschwingbreite wurde an der maßgebenden Querschnittsfläche $A = 50\text{mm} \times 25\text{mm} = 1250\text{mm}^2$ ermittelt.

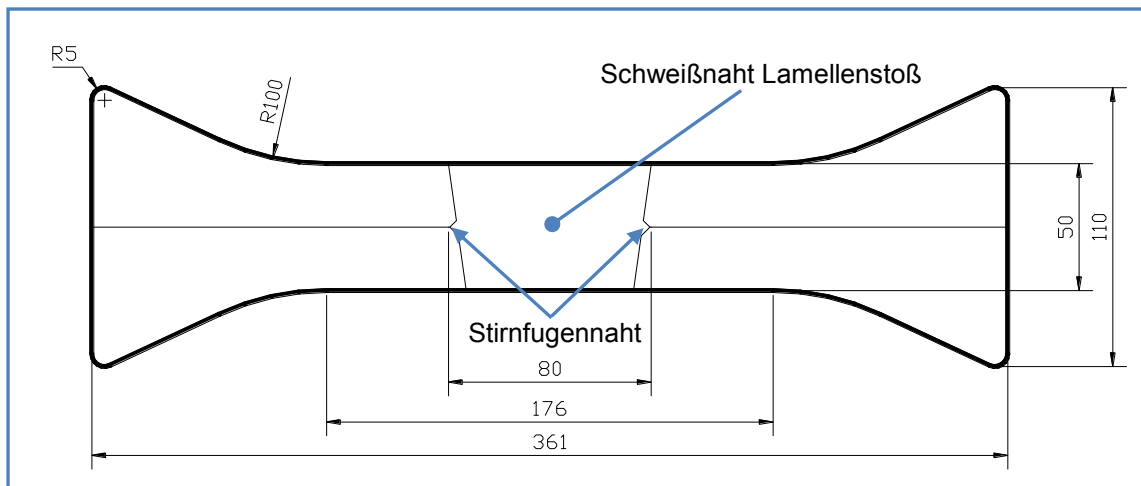


Abb. 58 Abmessungen Kleinversuchskörper; Quelle: eigene Darstellung

7.3. Versuchsaufbau A-1

Der Versuchsaufbau A-1 resultiert aus den Überlegungen, einen Versuchsaufbau zu konstruieren, bei dem die Herstellung der Prüfkörpergeometrie und ein Probenwechsel mit möglichst wenig Arbeit realisierbar sind. Es wurde vom Verfasser eine Prüfkörpergeometrie mit keilförmigen Enden gewählt (siehe Abb. 58). In die Aufnahmen wurde das Negativ dieser flachen Keile eingearbeitet. Durch je eine Justiereinheit oben und unten konnte der Prüfkörper in den Klauen mittig ausgerichtet und fixiert werden. Das Justieren wurde bei einigen Schwingspielen mit geringen Kräften durchgeführt, bis sich ein ruhig laufender Prüfaufbau einstellt. Vor den Versuchen wurden der Versuchsaufbau und die Methode der Justierung durch Messungen mit Dehnmessstreifen an einem Dummy kalibriert und somit eine momentenfreie Krafteinleitung sichergestellt.

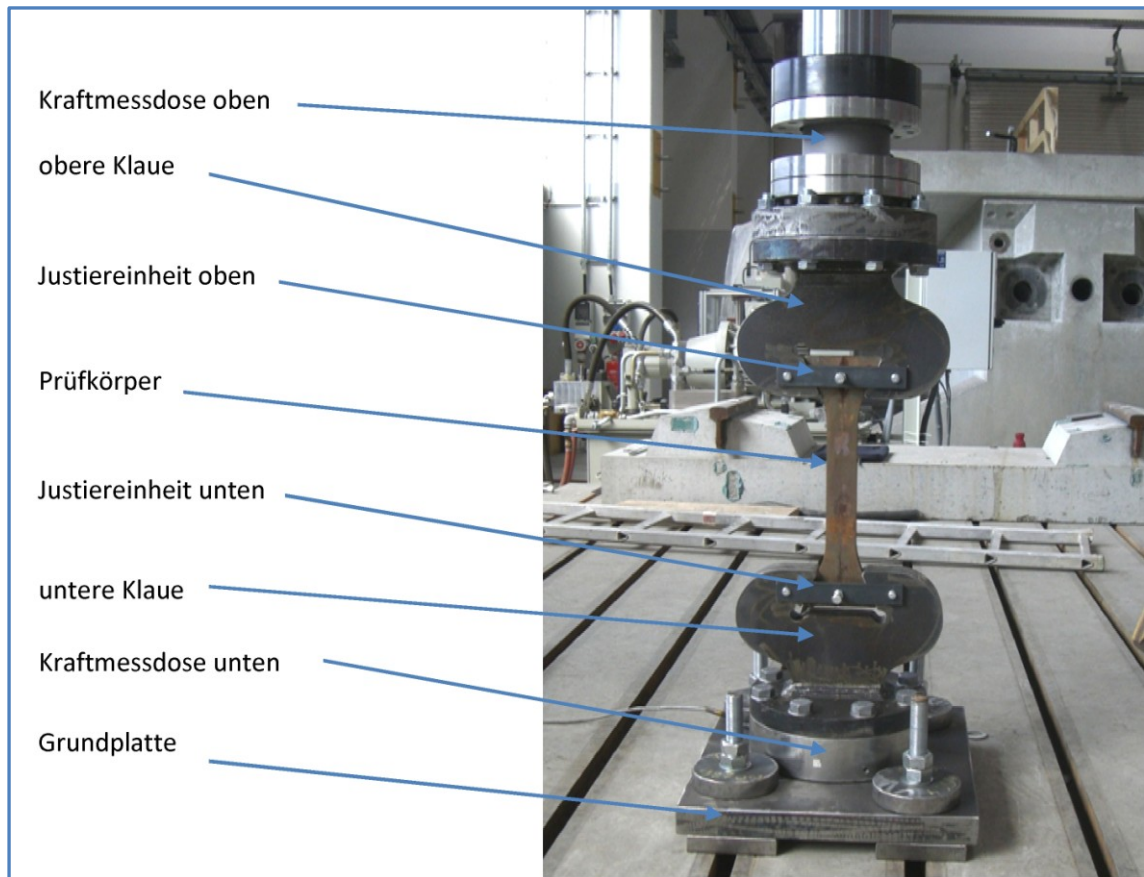


Abb. 59 Versuchsaufbau A-1, Kleinversuche; Quelle: Max Bögl

7.4. Versuchsergebnisse Versuchsaufbau A-1

Mit dem Versuchsaufbau A-1 wurden drei Versuche bei einer Schwingbreite von $\Delta\sigma = 100 \text{ N/mm}^2$ durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tab. 15 dargestellt. Der Startpunkt der Ermüdungsrisse lag bei allen Prüfkörpern am Wurzelpunkt der Stirnfugennaht. Der gebrochene Prüfkörper ist in Abb. 60 abgebildet. Die zugehörigen Bruchbilder zeigt die Abb. 61.

Tab. 15 Versuchsergebnisse Versuchsaufbau A-1; Quelle: eigene Darstellung

Nr	Spannungs- schwingbreite [N/mm ²]	Schwingspiele [-]	Beobachtung Stirnfugennaht
			Position Versagensanriss (Abb. 36)
			Bemerkung
K.Pk2	100	1.233.077	beobachtetes Risswachstum
			Versagen am Wurzelpunkt der Stirnfugennaht
			Pumpeffekt hat großen Einfluss auf das Ergebniss
K.Pk3	100	1.169.550	beobachtetes Risswachstum
			Versagen am Wurzelpunkt der Stirnfugennaht
			Pumpeffekt hat großen Einfluss auf das Ergebniss

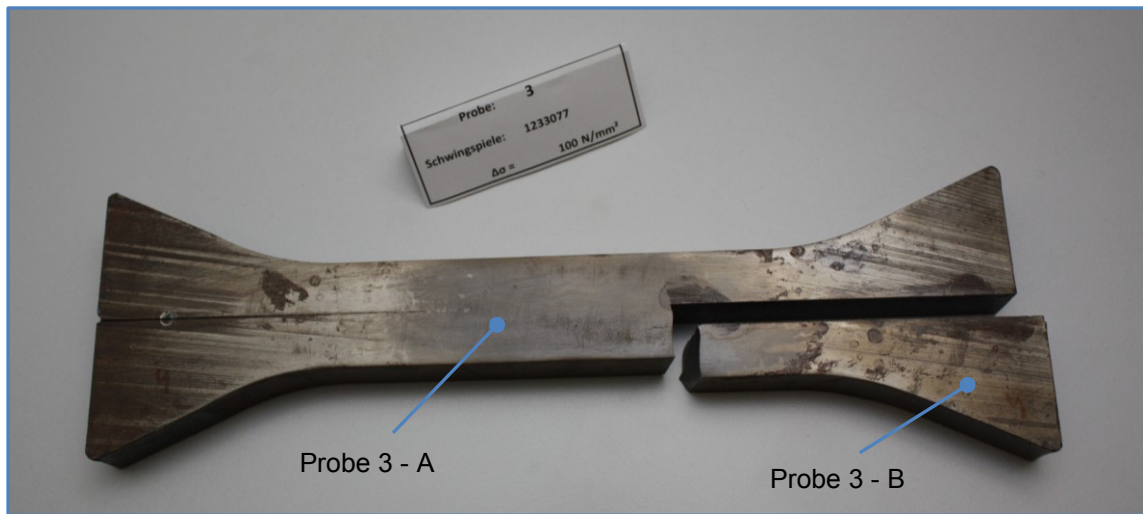


Abb. 60 Probekörper 3, Ermüdungsbruch bei $N = 1233077$ Lastwechseln; Quelle: Max Bögl

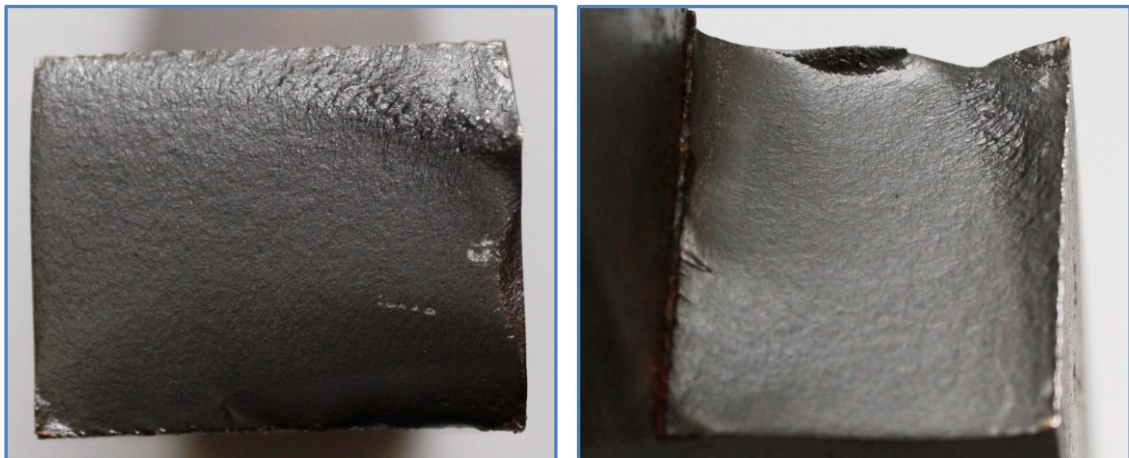


Abb. 61 Bruchbilder Probe 3, B und A; Quelle: eigene Darstellung

Während der Versuche zeigte sich, dass resultierend aus dem Versuchsaufbau die Probe unter Belastung an der Blechtrennung auseinanderklafft. Dieser Effekt ist in der Abb. 62 schematisch dargestellt. Im Zustand A (unterer Spannungspunkt der Doppelspannungsamplitude) entsprach das Spaltmaß gleichmäßig den Toleranzen, die aus der Herstellung des Musterstückes I resultieren (ca. 0,1mm – 0,2mm). Bei der Lastzunahme bis zum Erreichen des Zustandes B (obere Spannungszustand der Doppelspannungsamplitude) klafft der Spalt auf (Spaltmaß ca. 1,0mm – 1,2mm). Diese Änderung des Spaltmaßes resultiert aus zwei Effekten (siehe Abb. 63):

- a) unter Last fängt der Querschnitt an, einzuschnüren, und da die beiden Bleche im Bereich der Blechtrennung nicht mit einander verbunden sind, ist die Einschnürung richtungsentgegengesetzt. Daraus resultiert ein geringes Spaltmaß Δs_E

- b) bei Zunahme der Last schließt sich der Spalt, und es bildet sich ein Druckpunkt aus (siehe Abb. 63). Die Zugkräfte F_Z steigen soweit an, dass die entgegengesetzten Kräfte F_H nicht mehr ausreichend groß sind und sich somit eine Verformungszustand einstellt. Die einzelnen Bleche klaffen um Δs_B auseinander. Die Stirnfugennaht stellt eine Einspannung der einzelnen Bleche dar, und an dieser Stelle kommt es zu einer Spannungserhöhung aus der Biegung $\Delta \sigma_B$.

Der Verfasser gab diesem Effekt den Namen „Pumpeffekt“. Das Spaltmaß resultiert aus $\Delta s_E + \Delta s_B$. Durch die Spannungserhöhung an der Stirnfugennaht entsteht eine Spannung, die nicht im realen Verhältnis zum Spannungszustand im Bauwerk steht. Durch diese Erkenntnis lassen sich die niedrigen Schwingspiele aus den Versuchen erklären. An der Stirnfugennaht herrscht nicht der Spannungszustand $\Delta \sigma$, sondern ein kombinierter aus $\Delta \sigma_{neu} = \Delta \sigma + \Delta \sigma_B$. Dieses Resultat führte zu der Überlegung, ein Überdrücken der Kräfte aus der Biegung durchzuführen und wurde im Versuchsaufbau A-2 realisiert.

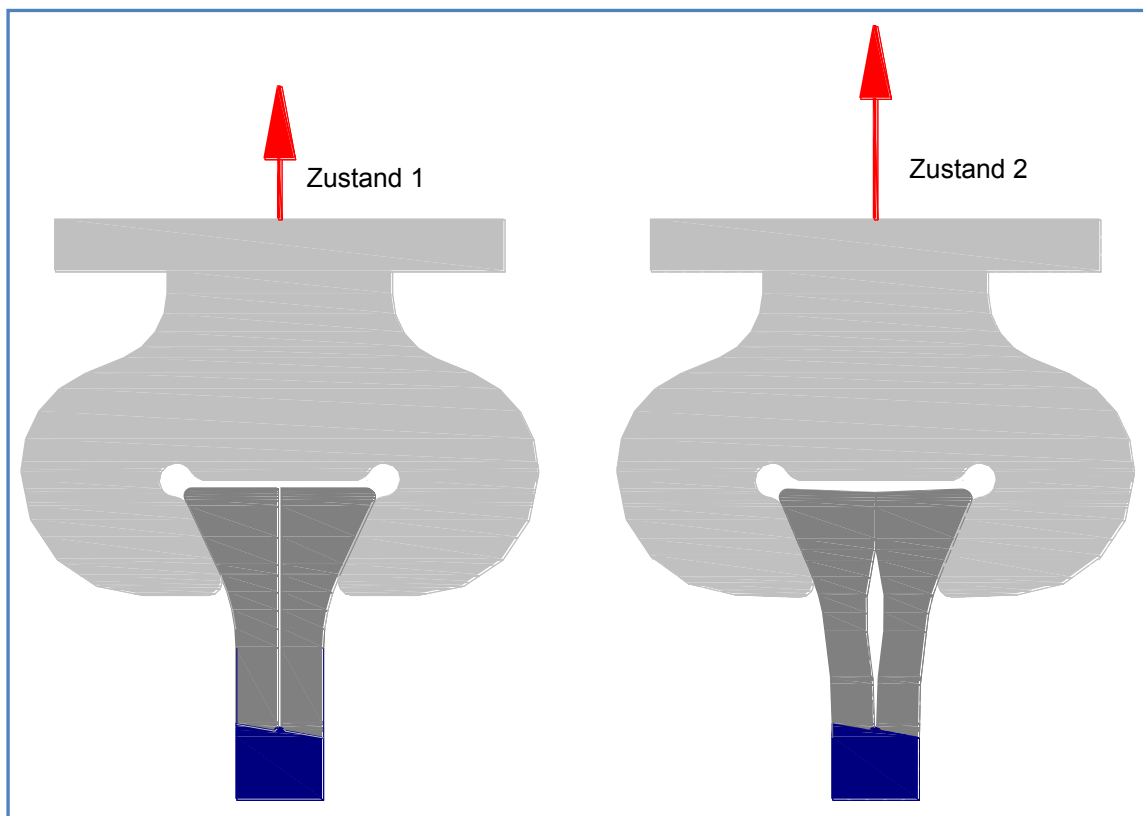


Abb. 62 Erklärung Pumpeffekt; Quelle: eigene Darstellung

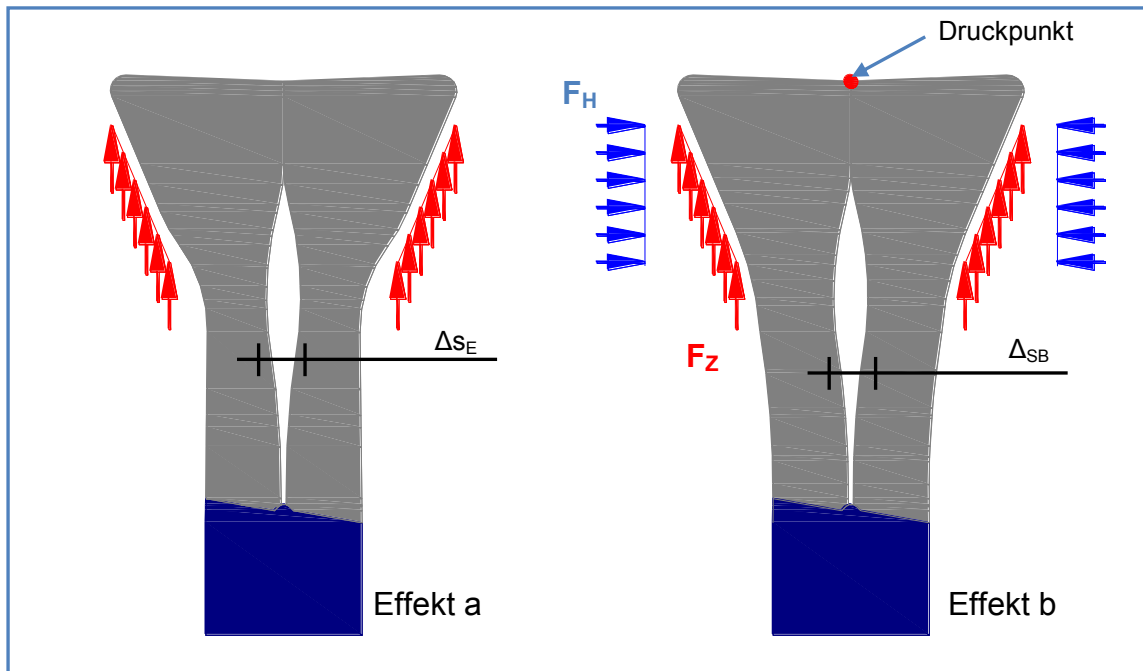


Abb. 63 Effekt a und b; Quelle: eigene Darstellung

7.5. Versuchsaufbau A-2

Im Wesentlichen entspricht der Versuchsaufbau A-2 dem Aufbau A-1 (Abs. 7.3). Wie die Abb. 64 zeigt, werden im Versuchsaufbau A-2 die Überlegungen aus Abs. 7.4, nämlich die Kräfte zu überdrücken, umgesetzt. Im Bereich der Blechtrennung wurde eine Klammer angebracht und durch eine Vorspannung der Gewindestangen eine Druckkraft aufgebracht. Beim Aufbringen der Prüfkräfte konnte kein Pumpeffekt zwischen den Blechen mehr festgestellt werden.

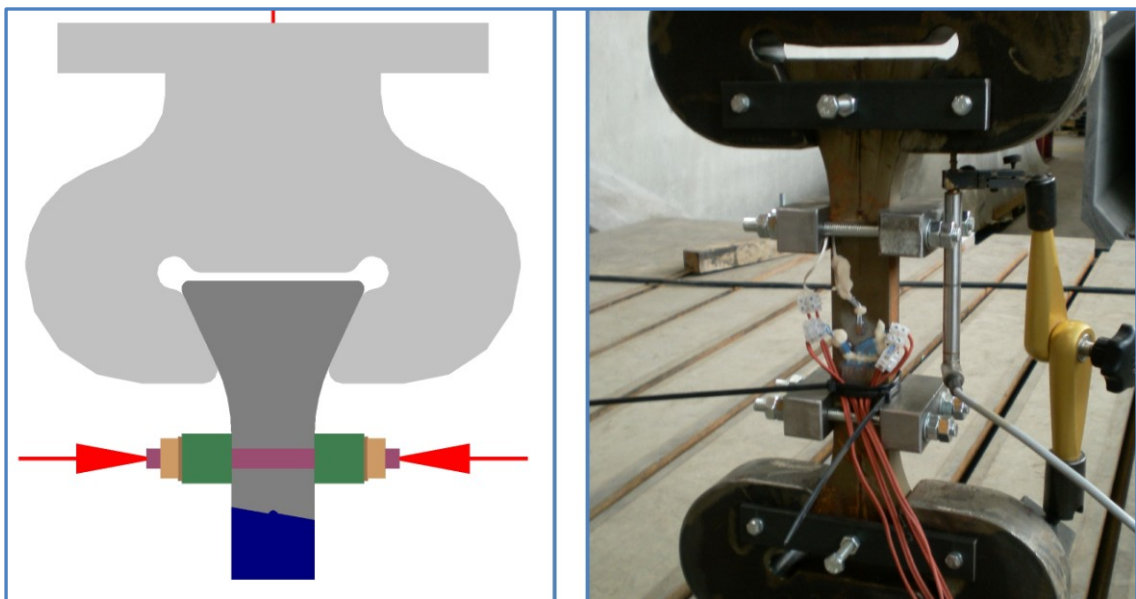


Abb. 64 Versuchsaufbau A-2, Kleinversuche; Quelle: eigene Darstellung

7.6. Versuchsergebnisse A-2

Mit dem Versuchsaufbau A-2 wurde ein Versuch mit einer Spannungsschwingbreite von $\Delta\sigma = 100\text{N/mm}^2$ durchgeführt. Beim Erreichen von 712.954 Lastspielen brach der Prüfkörper im Bereich der Krafteinleitung (Abb. 65). Auf Grund dieser Ergebnisse wurde der Versuchsaufbau A verworfen und ein neuer Versuchsaufbau B konstruiert.

Tab. 16 Versuchsergebnisse Versuchsaufbau A-2; Quelle: eigene Darstellung

Nr	Spannungsschwingbreite [N/mm ²]	Schwingspiele [-]	Beobachtung Stirnfugennaht
			Position Versagensanriss (Abb. 36)
			Bemerkung
K.Pk3	100	712.954	-
			Versagen im Bereich der Einspannung
			-

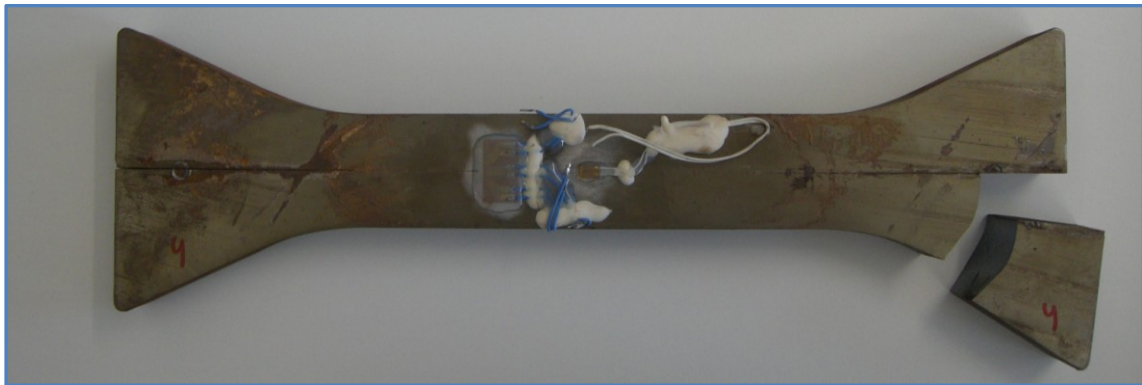


Abb. 65 Ermüdungsbruch Probekörper 1; Quelle: Max Bögl

7.7. Versuchsaufbau B

Der Versuchsaufbau B ist im Prinzip baugleich mit dem Versuchsaufbau der Großversuche im Abs. 6.2. Das Prinzip des Reibschlusses wurde auch im Versuchsaufbau B angewendet. (siehe Abb. 66). Die Anordnung der Kraftmessdosen aus Versuchsaufbau A und die Abbruchkriterien wurden im Versuchsaufbau B beibehalten.

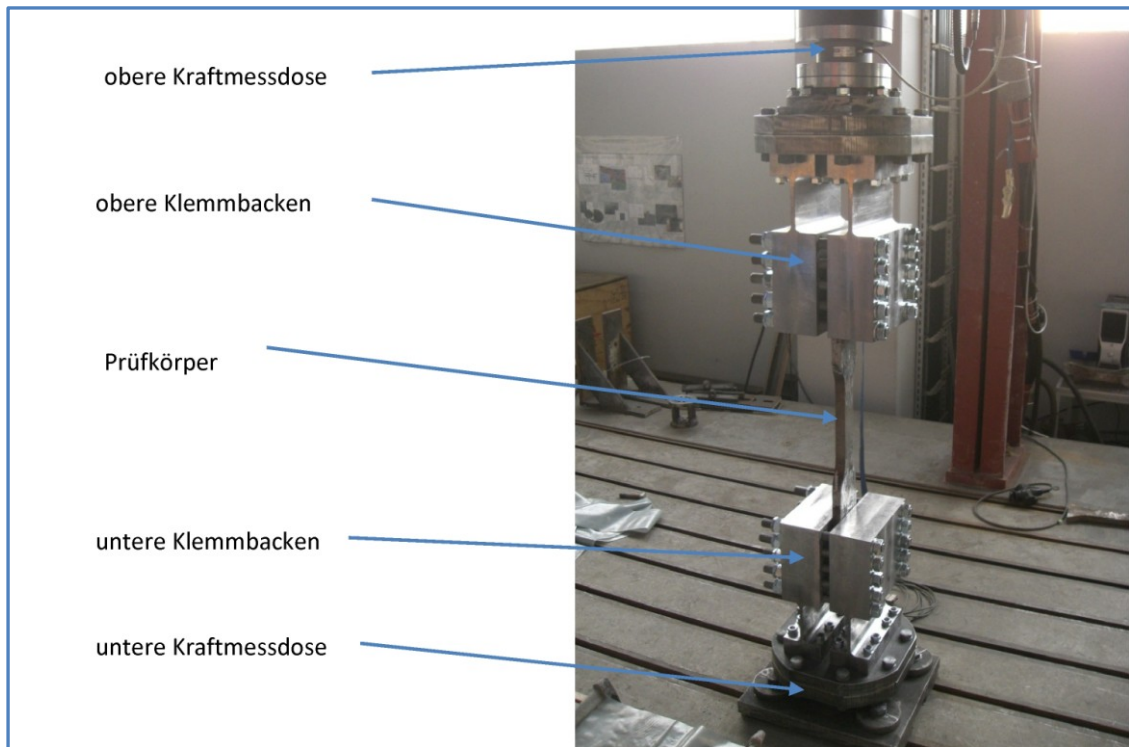


Abb. 66 Versuchsaufbau B; Quelle: eigene Darstellung

7.8. Versuchskörper B

Die in Abb. 67 dargestellten Versuchskörper entsprechen bis auf die Änderung durch Anschweißen den Versuchskörpern aus Abs. 7.2. An diese Versuchskörper aus dem Musterstück I wurden Anschweißen durch eine X-Nacht angeschweißt. Auch hier wurden ebenfalls An- und Auslaufstücke verwendet. Dies ist vergleichbar mit der Probekörperverlängerung aus Abs. 6.1. Nur die Schweißnähte dieser Stumpfstoße wurden kerbfrei beschliffen. Um eine Spannungsschwingbreite von $\Delta\sigma = 200\text{N/mm}^2$ zu erzeugen; wurde der Prüfkörperquerschnitt bei zwei Prüfkörpern durch Fräsen auf $50\text{mm} \times 15\text{mm}$ herabgesetzt.

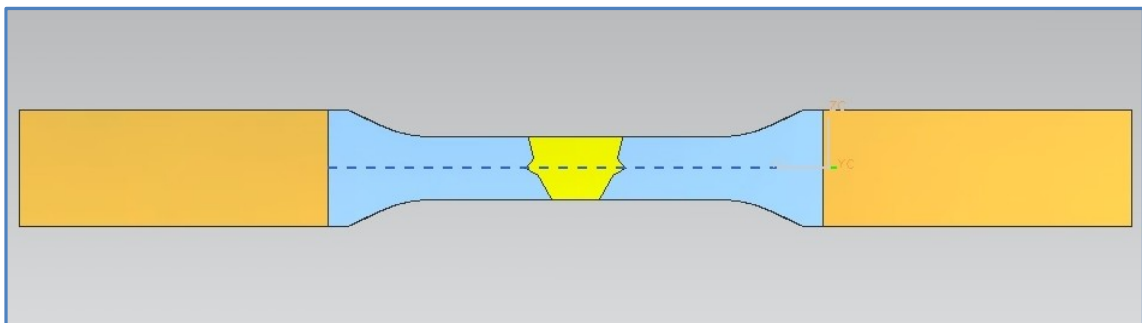


Abb. 67 Versuchskörper B; Quelle: eigene Darstellung

7.9. Versuchsergebnisse, Versuchsaufbau B

Mit dem Versuchsaufbau B wurden drei Versuche durchgeführt. In der nachfolgenden Tab. 17 sind die erzielten Schwingspiele bis zum Prüfkörperbruch in Abhängigkeit der Spannungsschwingbreite dokumentiert.

Tab. 17 Versuchsergebnisse, Versuchsaufbau B; Quelle: eigenen Darstellung

Nr	Spannungsschwingbreite [N/mm ²]	Schwingspiele [-]	Beobachtung Stirnfugennaht
			Position Versagensanriss (Abb. 36)
			Bemerkung
K.Pk4	150	2.000.000	-
			-
			Durchläufer
K.Pk5	200	3.180.000	beobachtetes Risswachstum
			Versagen am Wurzelpunkt der Stirnfugennaht
			-
K.Pk5	200	5.330.000	beobachtetes Risswachstum
			Versagen am Wurzelpunkt der Stirnfugennaht
			-

Der Versuch mit K.Pk4 wurde bei 2.000.000 Schwingspielen abgebrochen und dieser als Durchläufer eingeordnet. In der Abb. 68 ist das Risswachstum des K.Pk5 dokumentiert. Deutlich zu erkennen ist, dass das Ermüdungsversagen von der Stirnfugennaht ausgeht. In der Abb. 69 ist der Prüfkörperbruch dargestellt. Die Abb. 70 zeigt die Bruchflächen des K.Pk5



Abb. 68 Rissfortschritt, K.Pk 5



Abb. 69 Probekörper, K.Pk5 nach dem Versuch: Quelle: eigene Darstellung

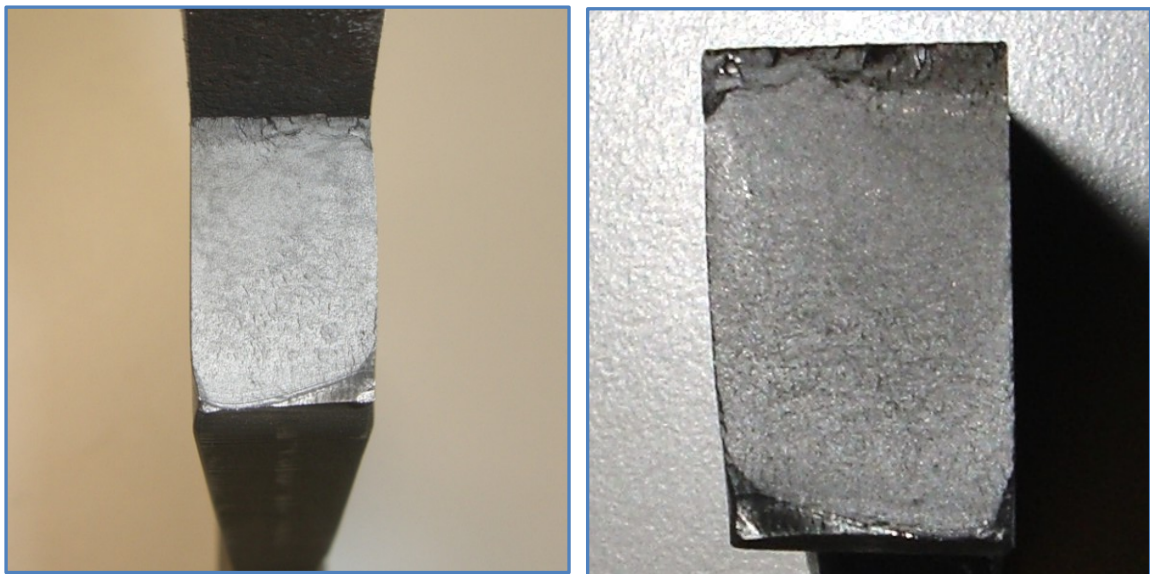


Abb. 70 Bruchflächen, K.Pk5; Quelle: eigene Darstellung

Durch die Versuche mit der Prüfkörperaufnahme B konnte der Einfluss der Stirnfugennaht auf die Ermüdungsfestigkeit ermittelt werden. Die hohen Schwingspielzahlen bei einer Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma = 200 \text{ N/mm}^2$ zeigen, wie sich bereits in den Großversuchen abgezeichnet, dass die Stirnfugennaht wenig Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit im Lamellenstoß des Musterstückes I hat. Auf Grund der wenigen vergleichbaren Ergebnisse aus den Kleinversuchen wird an dieser Stelle auf eine statistische Auswertung verzichtet. Die Bewertung und Zusammenfassung der Ergebnisse erfolgen in Abs. 9.

8. Auswertung externe Ergebnisse

8.1. LBF Bericht 3205 (1974) [27]

Der dem Verfasser vorliegende Forschungsbericht LBF Bericht 3205 (siehe Anlage Anhang D) [27] wurde vom Laboratorium für Betriebsfestigkeit in Darmstadt im Auftrag der Deutschen Bundesbahn 1974 erstellt. Dieser Bericht ist unveröffentlicht dieser in Auszügen als Artikel im Stahlbau 1977 [28] erschienen.

Ansprechpartner bei der Deutschen Bahn AG für den Forschungsbericht ist:

Michael Albert

Vorstandsressort Technik

Systemverbund und Dienstleistungen

Technik Bauliche Anlagen (TEC 3)

Deutsche Bahn AG Richelstraße 3, 80634 München

Tel. +49 (0)89 1308-5930, Fax -2405

Michael.Albert@deutschebahn.com

Die Ergebnisse aus diesem Forschungsbericht werden an diese Stelle nach dem in Abs. 2.2 erläuterten Verfahren neu ausgewertet.

8.1.1. Prüfkörperherstellung und Angaben zum Grundwerkstoff

Die für die Untersuchungen verwendeten Prüfkörper wurden aus zwei übereinanderliegenden Blechen hergestellt. Als Grundwerkstoff diente ein 31,5mm starkes Blech aus ST 52-3 (siehe Tab. 18). Die Materialkennwerte sind in der Tab. 19 dargestellt. Ebenfalls liegt der Auszug aus der Schmelzanalyse vor (siehe Tab. 20).

Tab. 18 Grundwerkstoff; Quelle: [27]

Bezeichnung:	Stahl ST 52-3 nach DIN 17100, normalisiert
Lieferwerk:	Hoesch Hüttenwerke Dortmund
Halbzeugform:	Blech 2500 x 10800

Tab. 19 Werkstoffkennwerte; Quelle: [27]

Streckgrenze [N/mm ²]	Zugfestigkeit [N/mm ²]	Bruchdehnung [%]
383	569	26

Tab. 20 Schmelzanalyse; Quelle: [27]

Schmelze Nr.	C	Si	Mn	P	S	Al	N
449511	0,18	0,49	1,34	0,018	0,012	0,055	0,006

Wie dem Forschungsbericht zu entnehmen ist, wurden die Prüfkörper unter den Bedingungen einer praxistgerechten Betriebsschweißung in einem Stahlbaubetrieb nach den einschlägigen Vorschriften der Deutschen Bundesbahn hergestellt, und die Schweißnähte wurden blecheben beschliffen. Die Schweißarbeiten wurden nicht in Zwangslage als E-Handscheidungen durchgeführt. Während der Schweißarbeiten waren die Probekörper fest eingespannt. Nach dem Schweißen wurden die Prüfkörper (siehe Abb. 71) aus den Platten durch Sägen herausgetrennt. Bei zwei Versuchskörpern war der Schweißverzug so groß, dass diese durch Fräsen nachbearbeitet werden mussten.

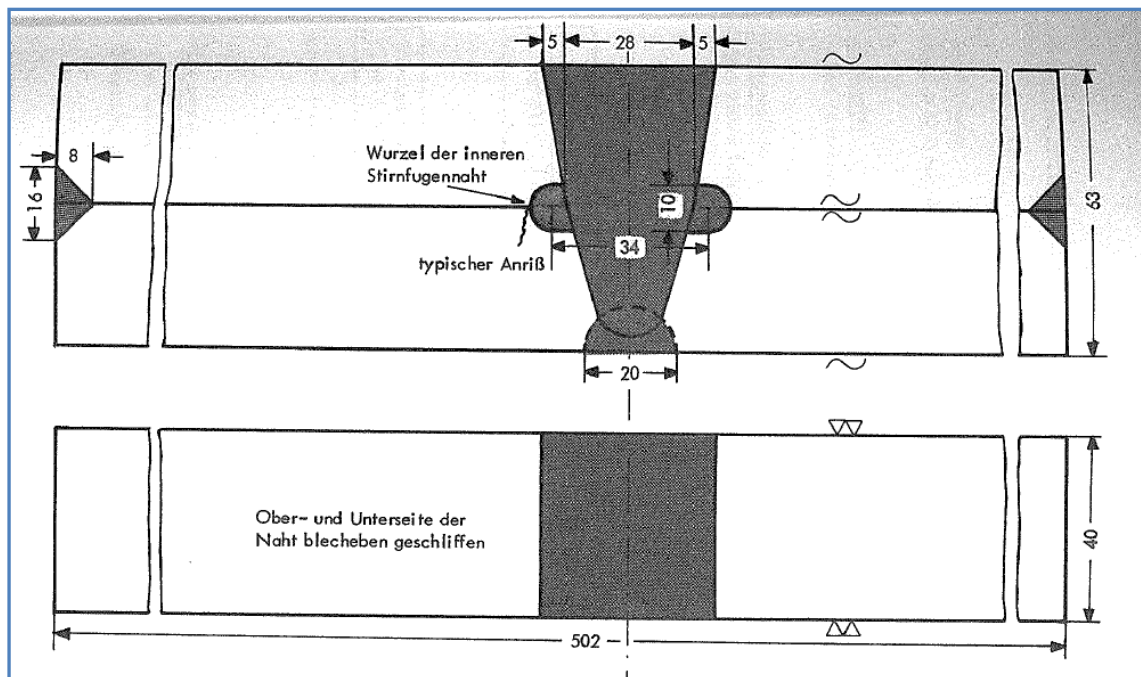


Abb. 71 Prüfkörperform; Quelle: [27]

8.1.2. Versuchsdurchführung und Versuchsergebnisse

Die Versuche wurden auf einem 600kN-Pulser durchgeführt. Die Prüfkraft wurde auf die Prüfkörper durch eine hydraulische Flachprobeneinspannung durch Reibschluß auf die Seitenflächen der Stäbe aufgebracht. In den Tab. 21 und Tab. 22 sind die Versuchsergebnisse der beiden Versuchsreihen mit einem konstanten Spannungsschwingverhältnis von $R=0$ und $R=-1$ dargestellt.

Tab. 21 Versuchsergebnisse Schwingversuche R=-1; Quelle: LBF 3205 [27]

R = -1		Blechabmessungen: 2x31,5mm			
Stab Nr.	Schwingbreite $\Delta\sigma$ [N/mm ²]	Lastspiele N [-]	Bemerkung		Ausgewertet
III U5	360	500.400	Bruch G	Anriss S	X
I U3	240	1.079.000	Bruch G	Anriss S	X
II U3	240	1.087.000	Bruch G	Anriss S	X
I U4	240	>1.908.000	ohne Bruch	Anriss S	X
III U9	240	>2.000.000	ohne Bruch	Anriss S	X
I U4a	360	310.000	Bruch S	hochgesetzter Durchläufer	X
Lage des Bruchausganges bzw. eines zusätzlichen Anrisses: G = im Grundwerkstoff; S = Wurzel der Stirnfugennaht; F = ein Fehler der Stumpfnaht					

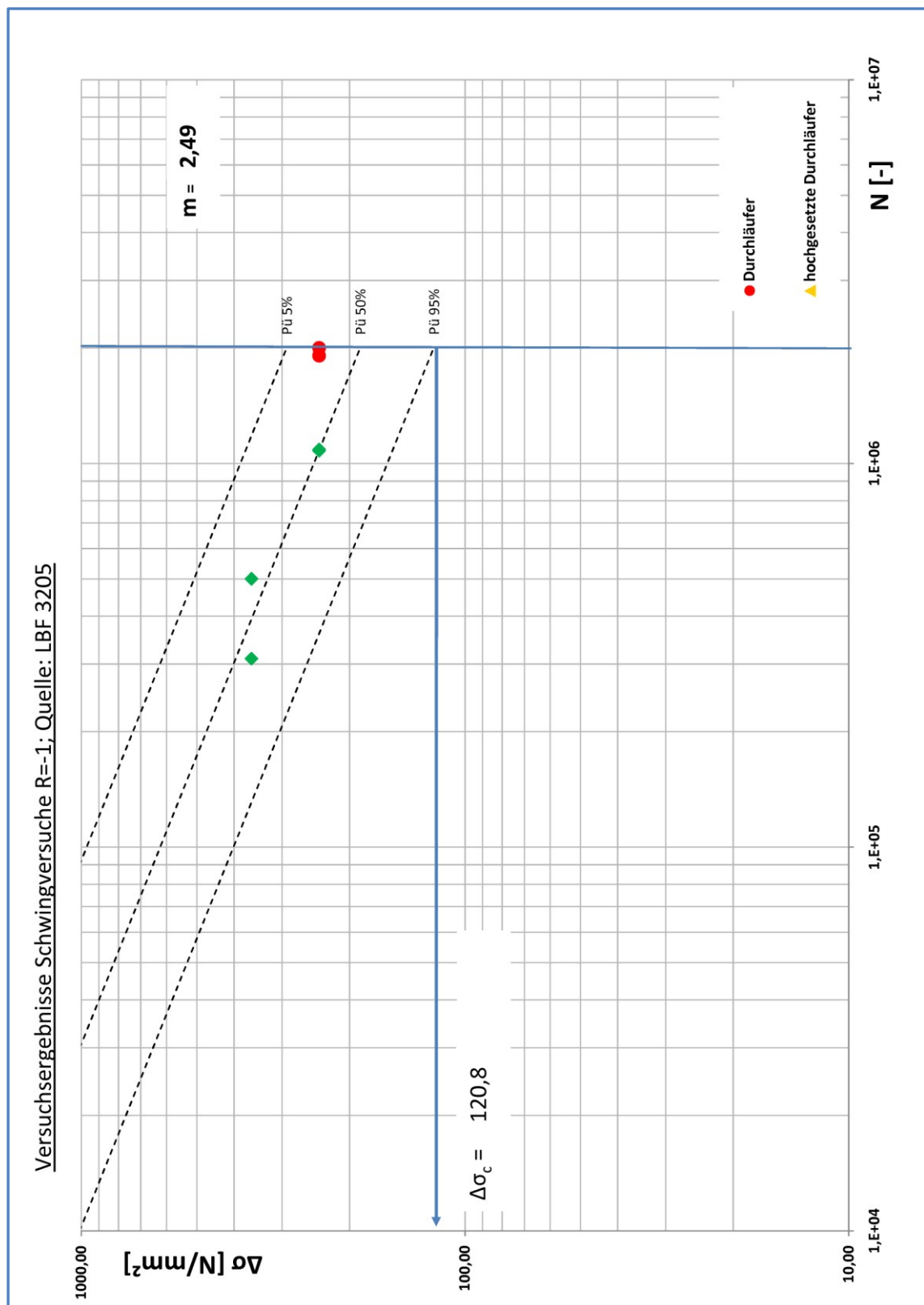


Abb. 72 Ergebnisse R=1, m= 2,49; Quelle: [27]

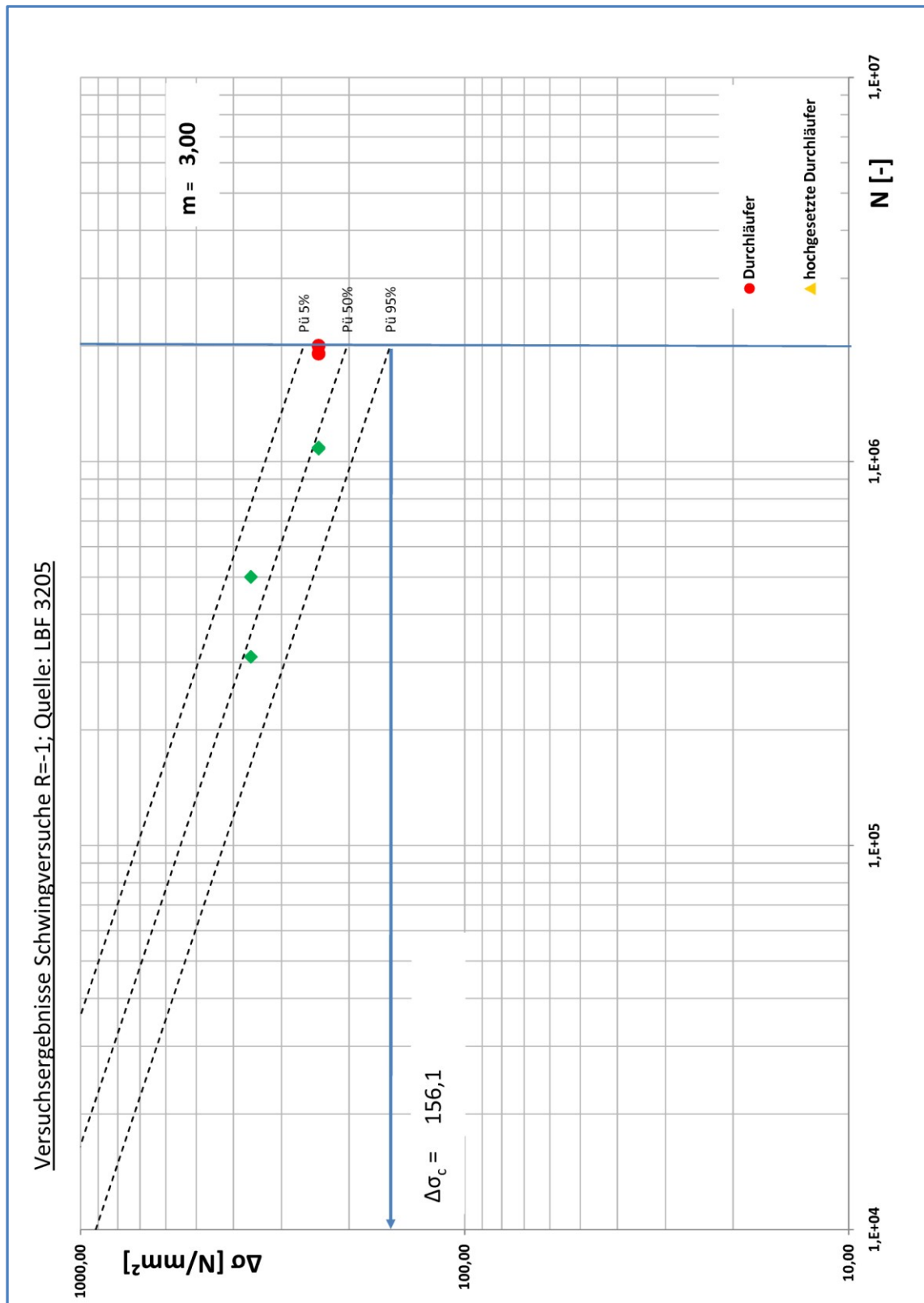


Abb. 73 Ergebnisse R=1, m= 3; Quelle: [27]

Tab. 22 Versuchsergebnisse Schwingversuche R=0; Quelle: LBF 3205 [27]

R = 0		Blechabmessungen: 2x31,5mm			
Stab Nr.	Schwingbreite $\Delta\sigma$ [N/mm ²]	Lastspiele N [-]	Bemerkung		Ausgewertet
II U2	240	75.000	Bruch S	abgefräst	
II U1	180	203.000	Bruch S	abgefräst	
I U1	240	183.000	Bruch G	Anriss S	X
III U1	240	190.000	Bruch F	Anriss S	X
III U4	240	349.000	Bruch S		X
I U2	240	567.000	Bruch S		X
III U6	240	798.000	Bruch G	Anriss S	
I U5	240	879.000	Bruch F	Anriss S	
III U7	180	>2.000.000	ohne Bruch	Anriss S	X
III U2	180	>3.200.000	ohne Bruch	Anriss S	X
III U2a	240	52.000	Bruch S	hochgesetzter Durchläufer	
III U7a	240	602.000	Bruch G	hochgesetzter Durchläufer, Anriss S	X
Lage des Bruchausganges bzw. eines zusätzlichen Anrisses: G = im Grundwerkstoff; S = Wurzel der Stirnfugennaht; F = ein Fehler der Stumpfnaht					

Die Ergebnisse der Prüfkörper III U6, I U5 und III U2a wurden in die Auswertung nicht mit einbezogen. Prüfkörper III U2a wurde nicht ausgewertet, weil es sich um einen hochgesetzten Durchläufer handelt. Bei den beiden anderen Prüfkörpern handelt es sich um die Prüfkörper, die durch Fräsen nachbearbeitet wurden. Daher sind die Kräfteverhältnisse in den Probekörpern nicht mehr mit den Kräfteverhältnissen der anderen Probekörpern vergleichbar. (siehe Abs. 8.1.1). Die Auswertungen und Ergebnisse sind in der Abb. 74 dargestellt. Die Steigung der Wöhlerkurve fällt genau auf $m=3$.

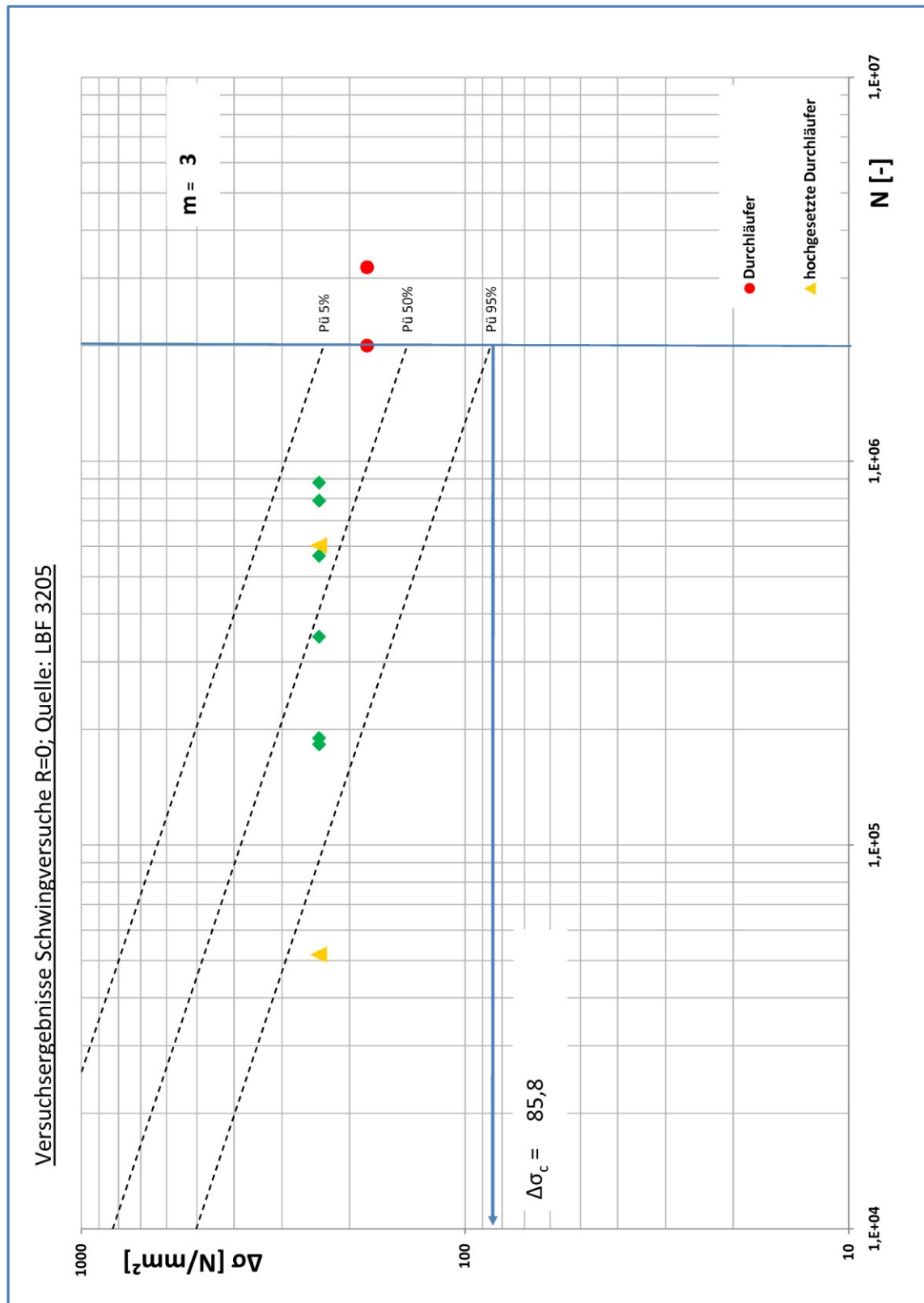


Abb. 74 Ergebnisse R=0, m= 3; Quelle: [27]

8.2. LBF Bericht 4879 (1982) [44]

Dem Verfasser liegt ebenfalls der Forschungsbericht LBF Bericht 4879 (siehe Anhang E) [44] vom Laboratorium für Betriebsfestigkeit in Darmstadt vor, welcher im Auftrag der Deutschen Bundesbahn 1982 erstellt wurde. In diesem Bericht wird von den Schwingfestigkeitsuntersuchungen an drei übereinanderliegenden Gurtplatten berichtet. Des Weiteren sind externe Ergebnisse aus Schwingfestigkeitsuntersuchungen an zwei übereinanderliegenden Gurtplatten angefügt. Dieser Bericht ist ebenfalls unveröffentlicht. Bei den wiedergegebenen Ergebnissen der Untersuchungen an zwei übereinanderliegenden Gurtplatten handelt es sich um Schwingversuche aus dem VEB MLK-Forschungsinstitut Leipzig [45]. Nach der Auflösung der Volkseigenen Betriebe entstand aus dem MLK Forschungsinstitut das Institut für Stahlbau Leipzig GmbH. Bei einem Umzug wurde die Forschungsberichte nicht archiviert, und sind somit heute leider nicht mehr verfügbar. Auch über den Verfasser P. Berger konnten kein Exemplar des Forschungsberichtes eingesehen werden. Die Ergebnisse wurden aus den alten Diagrammen ausgelesen und nach den statistischen Methoden aus Abs. 2.2 neu ausgewertet. Aus Gründen der Vollständigkeit werden die Ergebnisse an drei Gurtplatten aus dem LBF Bericht 4879 [44] ebenfalls aufgeführt.

Ansprechpartner bei der Deutschen Bahn AG für den Forschungsbericht ist ebenfalls:

Michael Albert

Vorstandsressort Technik

Systemverbund und Dienstleistungen

Technik Bauliche Anlagen (TEC 3)

Deutsche Bahn AG Richelstraße 3, 80634 München

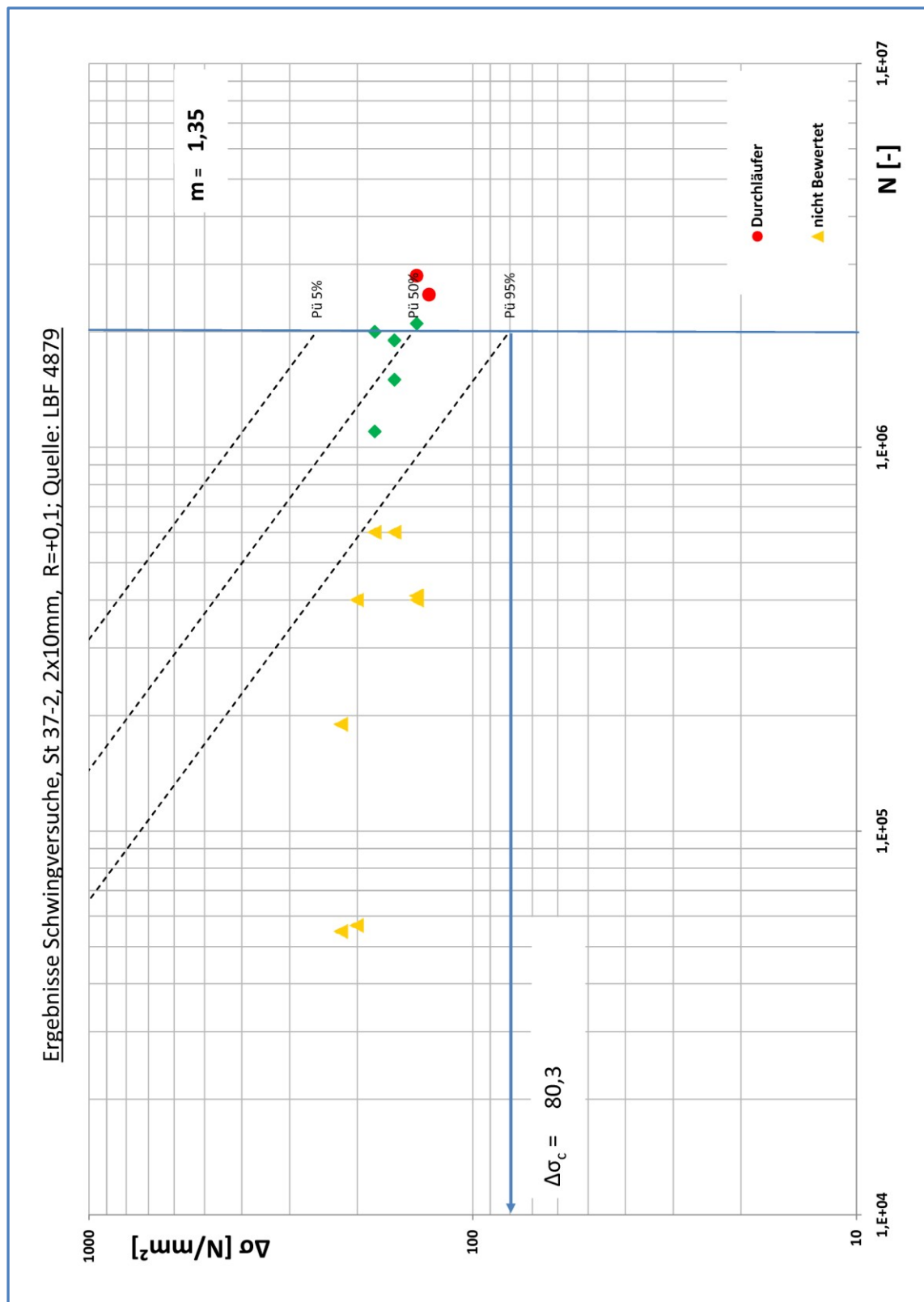
Tel. +49 (0)89 1308-5930, Fax -2405

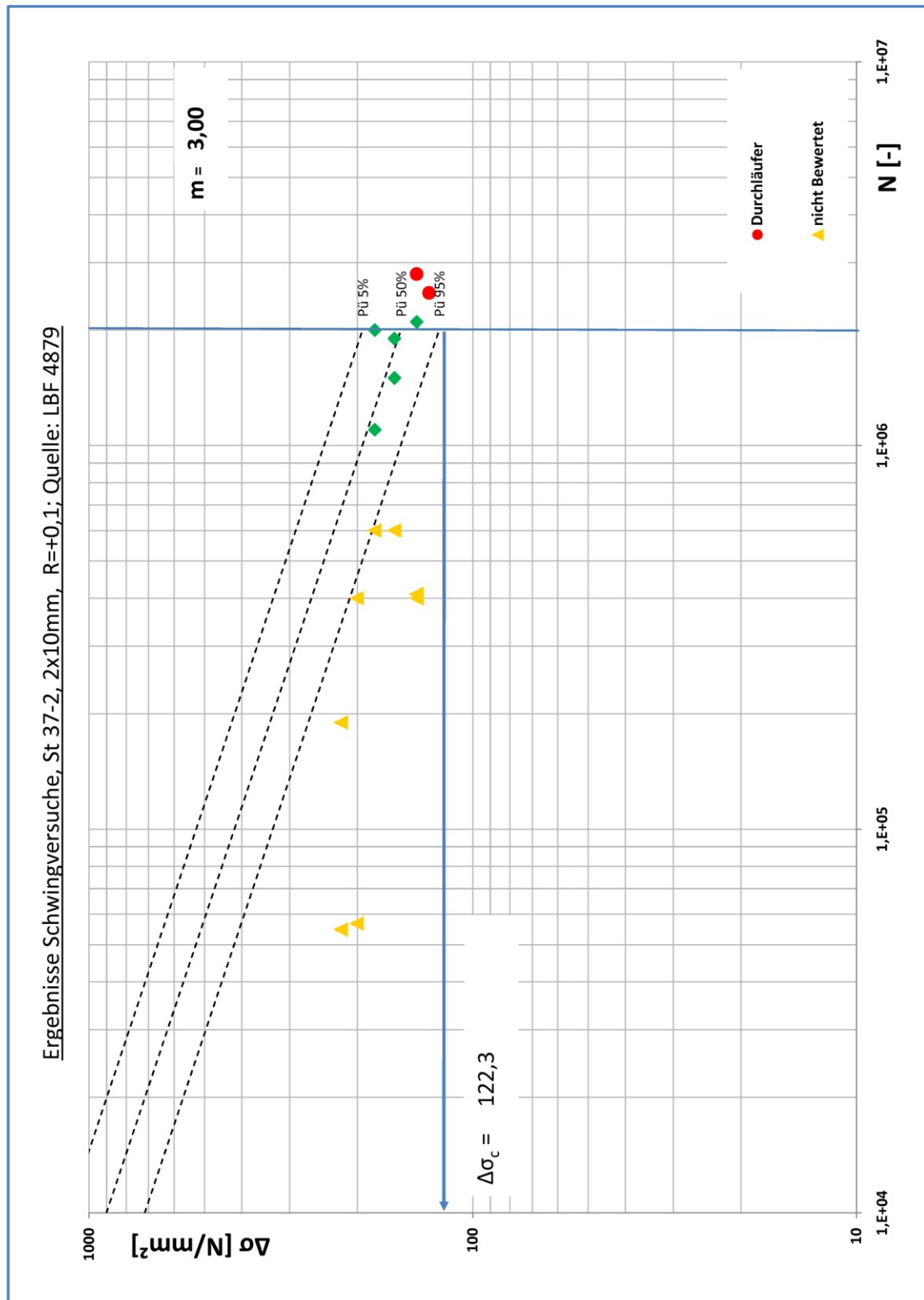
Michael.Albert@deutschebahn.com

8.2.1. Auswertung der Versuchsergebnisse P. Berger [45]

Tab. 23 Ergebnisse Schwingversuche, St 37-2, 2x10mm, R=+0,1; Quelle: LBF 4879 [44]

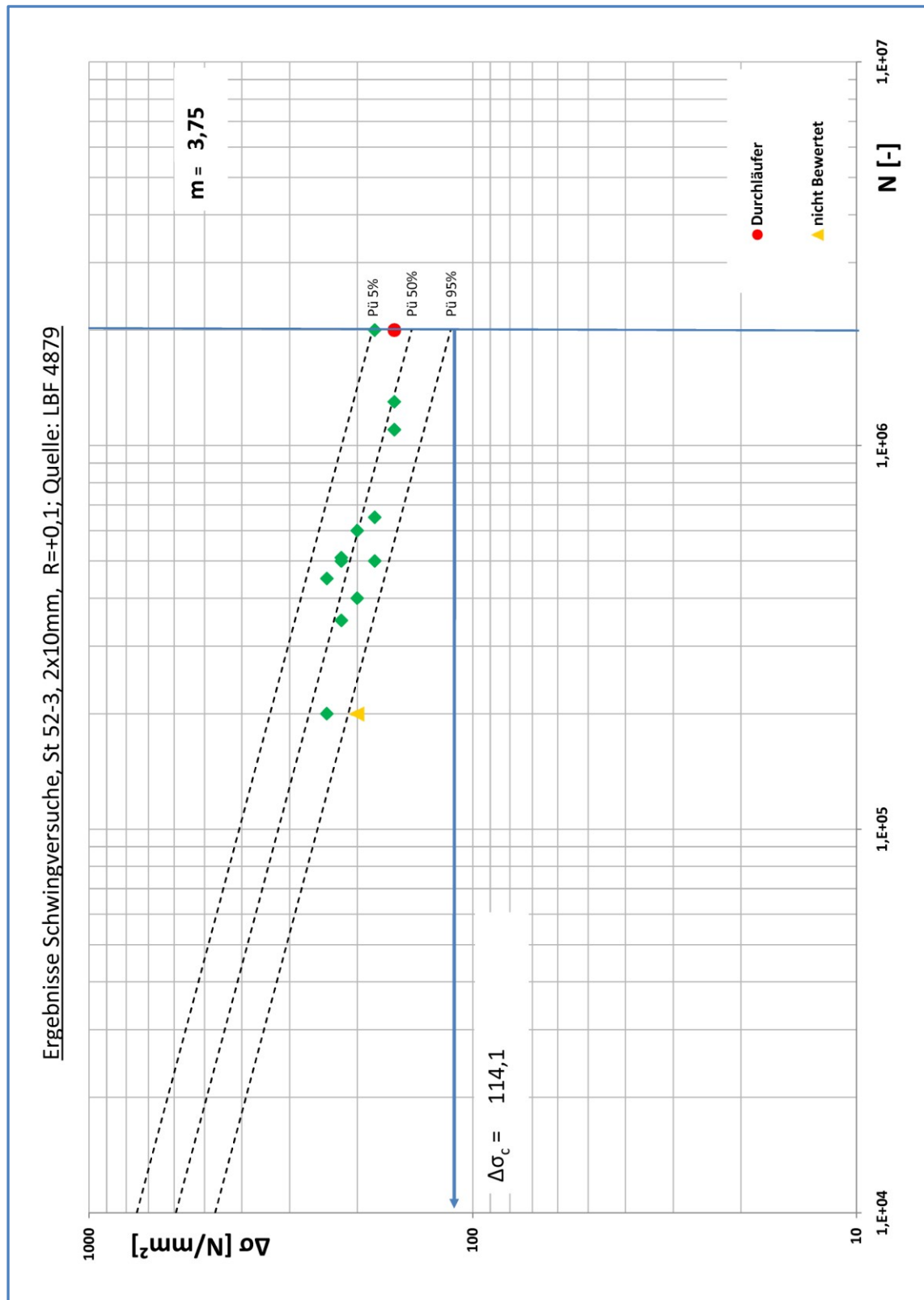
R = +0,1		Blechabmessungen 2x10mm St 37-2	
Stab Nr.	Schwingbreite $\Delta\sigma$ [N/mm ²]	Lastspiele N [-]	Ausgewertet
1	220	55.000	
2	220	190.000	
3	200	57.000	
4	200	400.000	
5	180	600.000	
6	180	1.100.000	X
7	180	2.000.000	X
8	160	600.000	
9	160	1.500.000	X
10	160	1.900.000	X
11	140	400.000	
12	140	410.000	
13	140	2.100.000	X
14	140	>2.800.000	
15	130	>2.500.000	

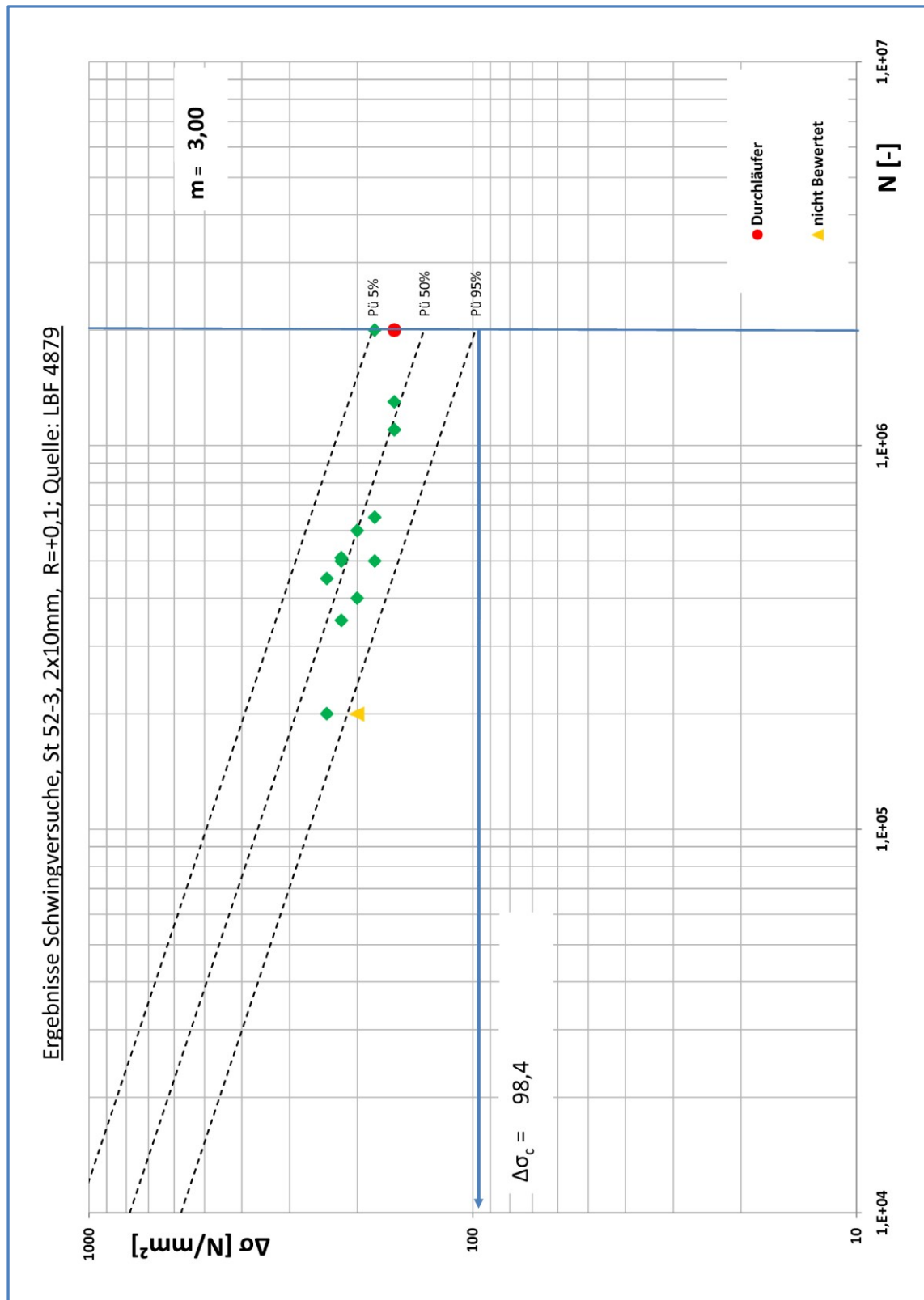
Abb. 75 Ergebnisse Schwingversuche, St 37-2, 2x10mm, $R=+0,1$, $m=1,35$; Quelle: LBF 4879 [44]



Tab. 24 Ergebnisse Schwingversuche, St 52-3, 2x10mm, R=+0,1; Quelle: LBF 4879 [44]

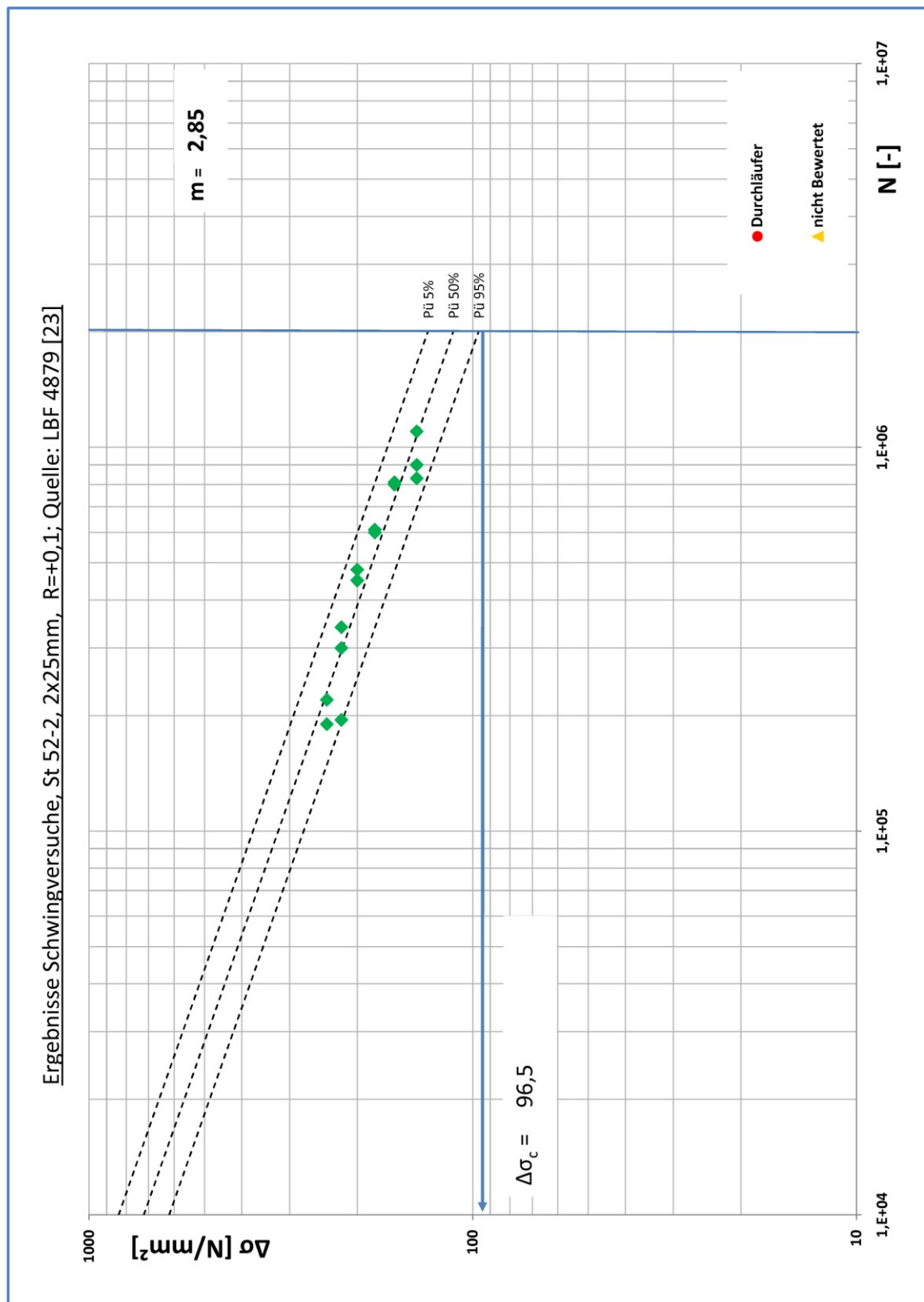
R = +0,1		Blechabmessungen 2x10mm St 52-3	
Stab Nr.	Schwingbreite $\Delta\sigma$ [N/mm ²]	Lastspiele N [-]	Ausgewertet
1	240	200.000	X
2	240	450.000	X
3	220	350.000	X
4	220	500.000	X
5	220	510.000	X
6	200	200.000	
7	200	400.000	X
8	200	600.000	X
9	180	500.000	X
10	180	650.000	X
11	180	2.000.000	X
12	160	1.100.000	X
13	160	1.300.000	X
14	160	2.000.000	X
15	160	>2.000.000	



Abb. 78 Ergebnisse Schwingversuche, St 52-3, 2x10mm, $R=+0,1$, $m=3$; Quelle: LBF 4879 [44]

Tab. 25 Ergebnisse Schwingversuche, St 52-2, 2x25mm, R=+0,1; Quelle: LBF 4879 [44]

R = +0,1		Blechabmessungen 2x25mm St 52-2	
Stab Nr.	Schwingbreite $\Delta\sigma$ [N/mm ²]	Lastspiele N [-]	Ausgewertet
1	240	190.000	X
2	240	220.000	X
3	220	195.000	X
4	220	300.000	X
5	220	340.000	X
6	200	450.000	X
7	200	480.000	X
8	180	600.000	X
9	180	610.000	X
10	160	800.000	X
11	160	810.000	X
12	140	830.000	X
13	140	900.000	X
14	140	1.100.000	X

Abb. 79 Ergebnisse Schwingversuche, St 52-2, 2x25mm, $R=+0,1$, $m=2,85$; Quelle: LBF 4879 [44]

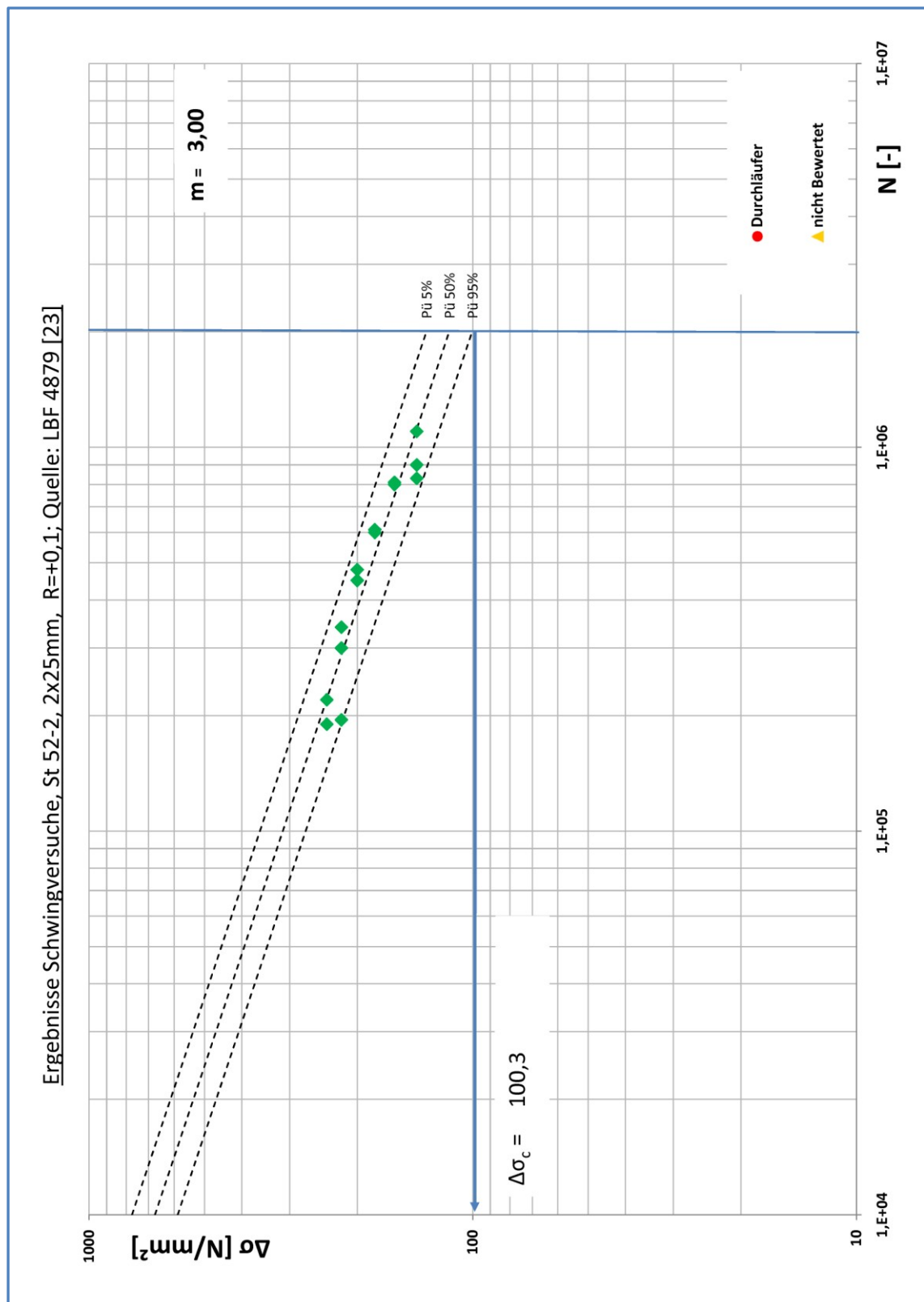


Abb. 80 Ergebnisse Schwingversuche, St 52-2, 2x25mm, R=+0,1, m=3; Quelle: LBF 4879 [44]

Tab. 26 Ergebnisse Schwingversuche, KT 52-2, 2x25mm, R=+0,1; Quelle: LBF 4879 [44]

R = +0,1		Blechabmessungen 2x25mm KT 52-2	
Stab Nr.	Schwingbreite $\Delta\sigma$ [N/mm ²]	Lastspiele N [-]	Ausgewertet
1	240	180.000	X
2	240	200.000	X
3	220	90.000	X
4	220	100.000	X
5	200	160.000	X
6	200	300.000	X
7	180	300.000	X
8	180	310.000	X
9	160	400.000	X
10	160	1.200.000	X
11	160	1.600.000	X
12	140	600.000	X
13	140	1.400.000	X
14	140	>2.600.000	X

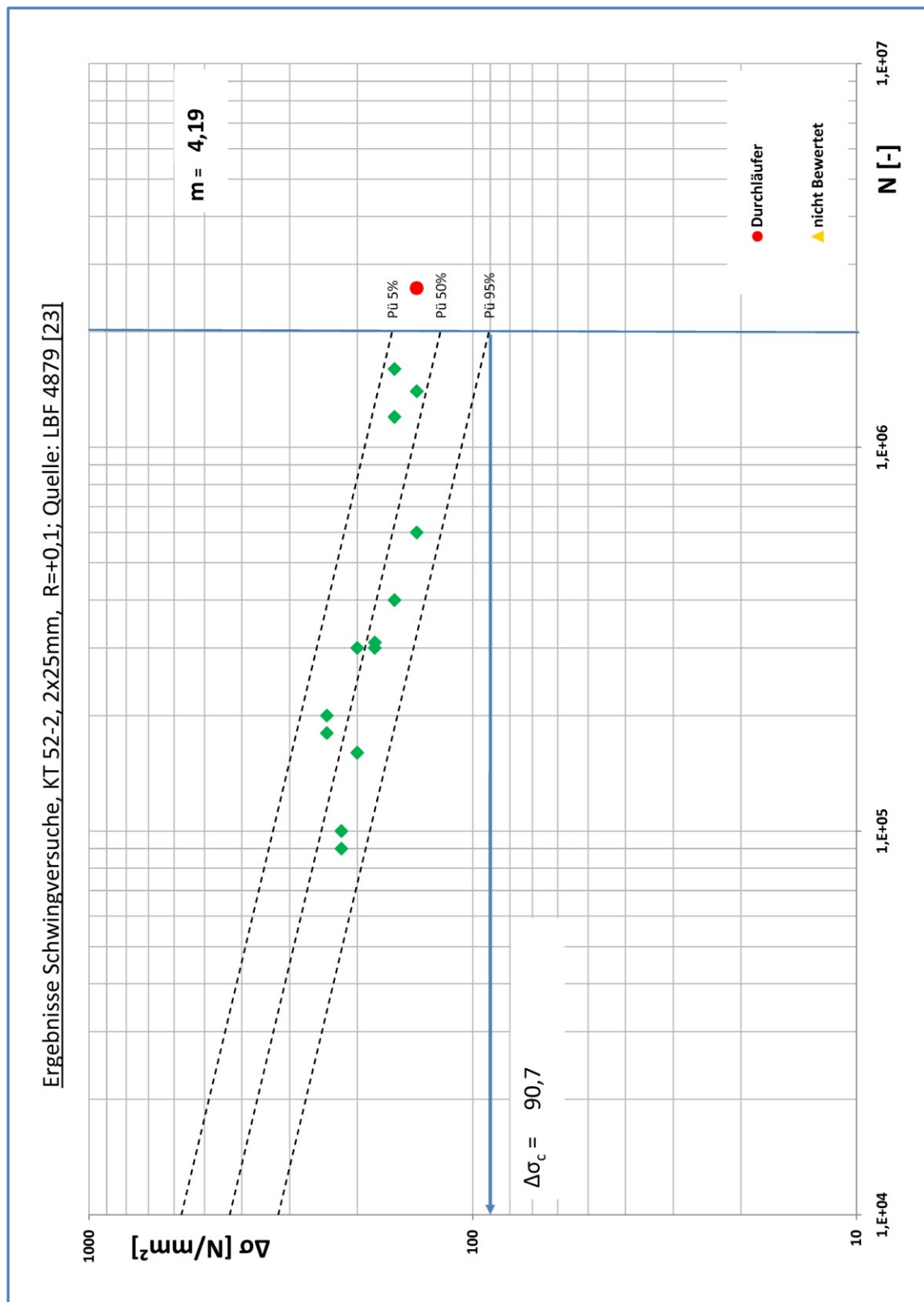


Abb. 81 Ergebnisse Schwingversuche, KT 52-2, 2x25mm, R=+0,1, m=4,19; Quelle: LBF 4879 [44]

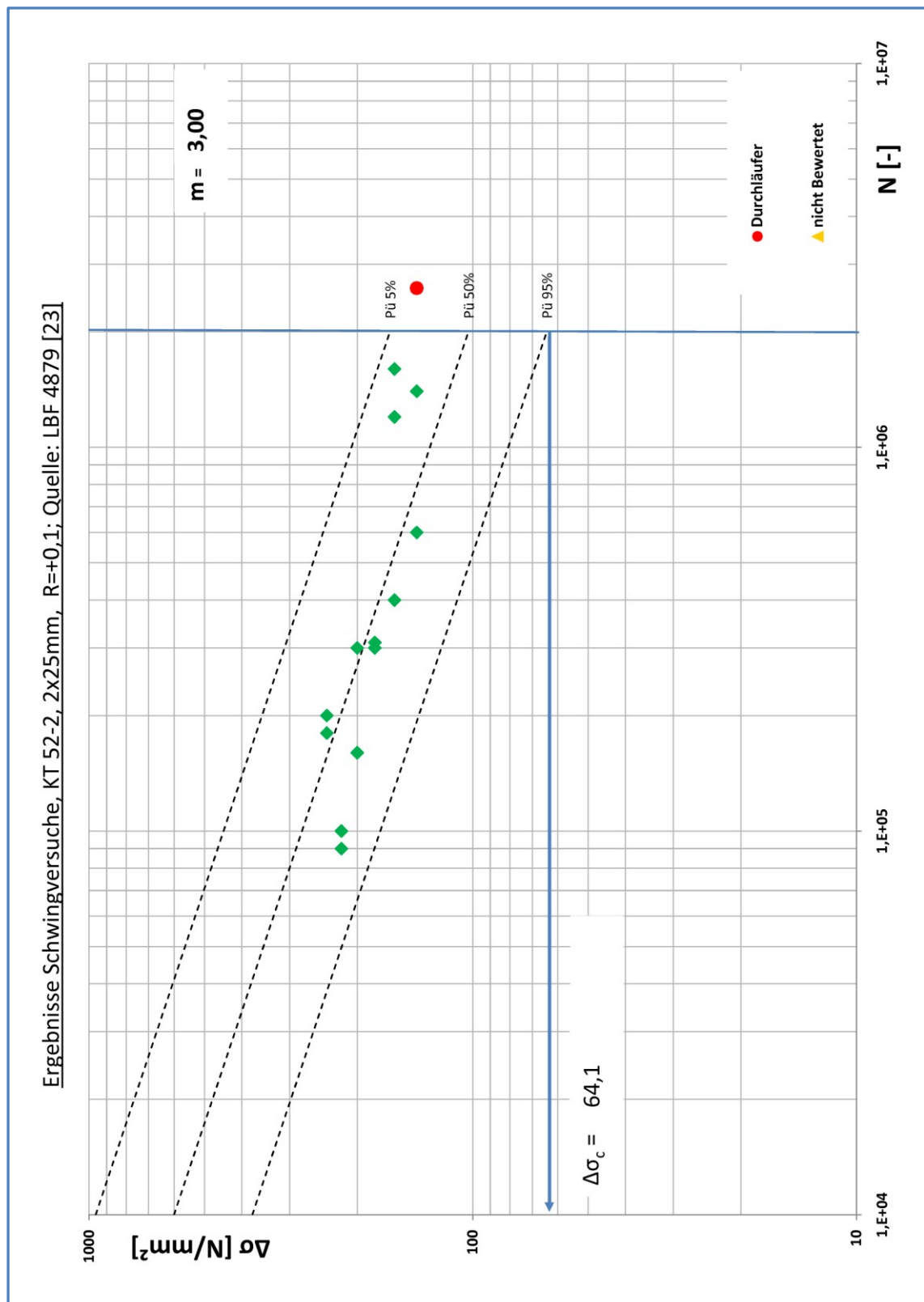
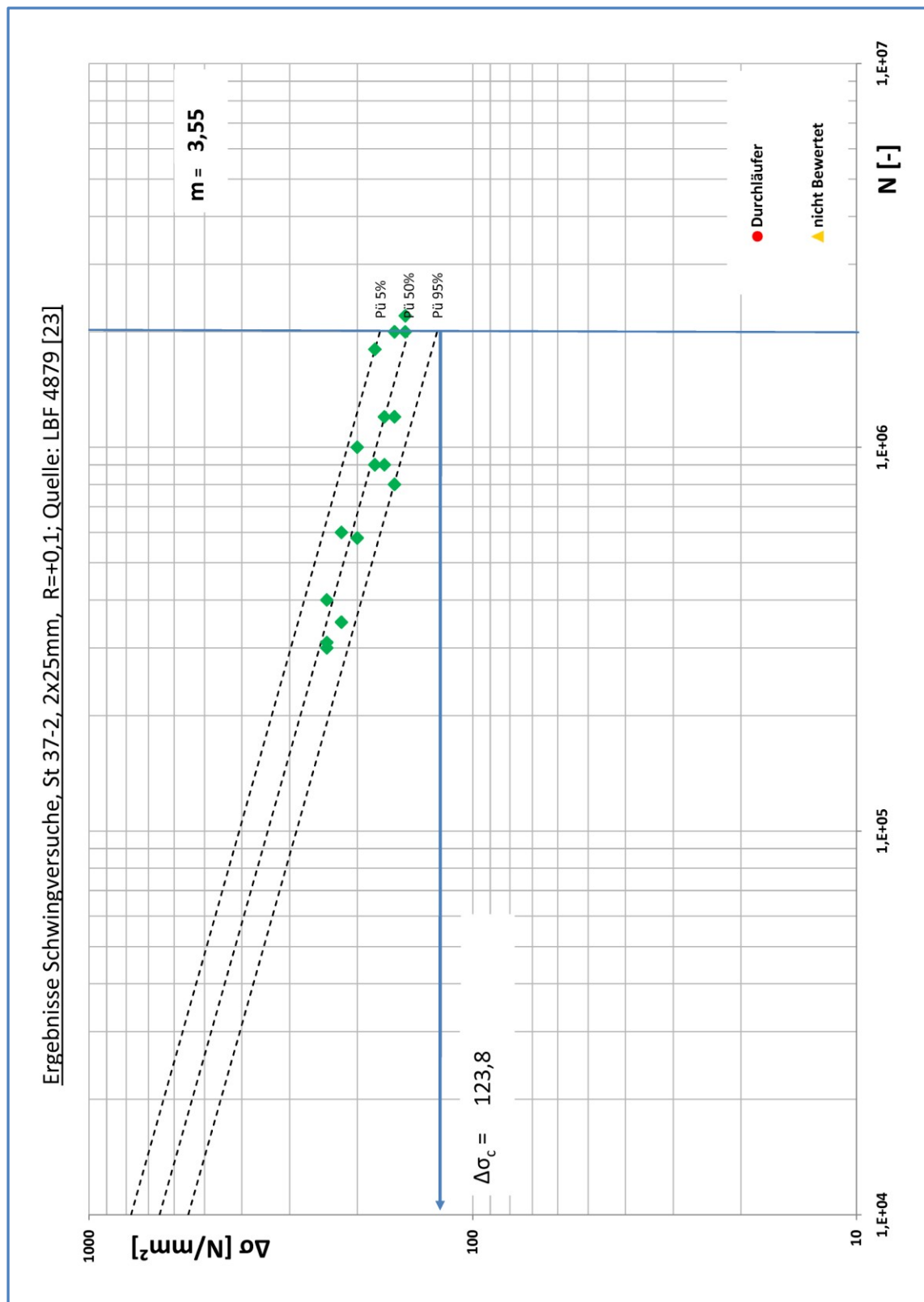
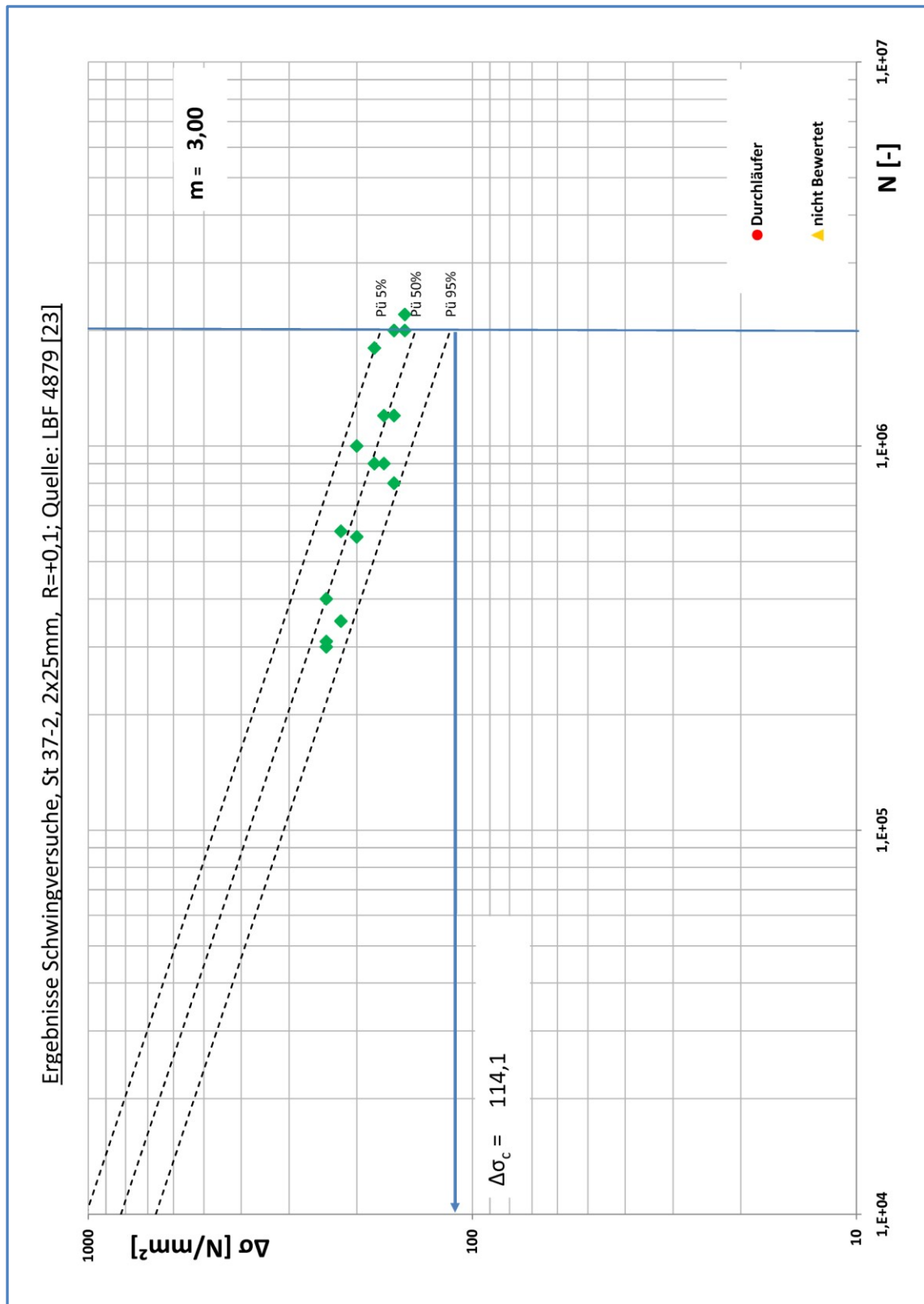


Abb. 82 Ergebnisse Schwingversuche, KT 52-2, 2x25mm, R=+0,1, m=3; Quelle: LBF 4879 [44]

Tab. 27 Ergebnisse Schwingversuche, St 37-2, 2x25mm, R=+0,1; Quelle: LBF 4879 [44]

R = +0,1		Blechabmessungen 2x25mm St 37-2	
Stab Nr.	Schwingbreite $\Delta\sigma$ [N/mm ²]	Lastspiele N [-]	Ausgewertet
1	240	300.000	X
2	240	310.000	X
3	240	400.000	X
4	220	350.000	X
5	220	600.000	X
6	200	580.000	X
7	200	1.000.000	X
8	180	900.000	X
9	180	1.800.000	X
10	170	900.000	X
11	170	1.200.000	X
12	160	800.000	X
13	160	1.200.000	X
14	160	2.000.000	X
15	150	2.000.000	X
16	150	2.200.000	X

Abb. 83 Ergebnisse Schwingversuche, St 37-2, 2x25mm, $R=+0,1$, $m=3,55$; Quelle: LBF 4879 [44]

Abb. 84 Ergebnisse Schwingversuche, St 37-2, 2x25mm, $R=+0,1$, $m=3$; Quelle: LBF 4879 [44]

8.2.2. Auswertung der Versuchsergebnisse LBF Bericht 4879 [44]

Die für die Untersuchungen verwendeten Prüfkörper wurden aus drei übereinanderliegenden Blechen hergestellt. Als Grundwerkstoff dienen 3x50mm und 30mm + 40mm + 30mm starke Bleche aus St 37-2 (siehe Abb. 85 und Abb. 86). Die Materialkennwerte sind in der Tab. 19 dargestellt. Ebenfalls liegt der Auszug aus der Schmelzanalyse vor (siehe Tab. 29).

Tab. 28 Werkstoffkennwerte; Quelle: [44]

	Streckgrenze [N/mm ²]	Zugfestigkeit [N/mm ²]	Bruchdehnung [%]
Blechdicke 30mm Schmelze-Nr. 470755	251	441	36
Blechdicke 40mm Schmelze-Nr. 439696	249	364	38
Blechdicke 50mm Schmelze-Nr. 441339	224	391	35

Tab. 29 Schmelzanalyse; Quelle: [44]

Schmelze Nr.	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Al %	N %	Cu %	Cr %	Ni %	Sn %
Blechdicke 30mm Schmelze-Nr. 470755	0,16	0,27	0,60	0,006	0,020	0,040	0,006	0,02	0,02	0,01	0,002
Blechdicke 40mm Schmelze-Nr. 439696	0,06	0,21	0,85	0,010	0,008	0,040	0,0062	0,02	0,02	0,02	0,004
Blechdicke 50mm Schmelze-Nr. 441339	0,14	0,25	0,52	0,012	0,017	0,030	0,0069	0,02	0,03	0,02	0,007

Wie dem Bericht LBF 4879 [44] zu entnehmen ist, wurden die Prüfkörper unter den Bedingungen einer praxisgerechten Betriebsschweißung in einem Stahlbaubetrieb nach den einschlägigen Vorschriften der Deutschen Bundesbahn durchgeführt. Die Schweißarbeiten wurden nicht in Zwangslage durchgeführt. Die Stirnfugennähte und die Wurzel der Stumpfnah wurden MAG geschweißt. Die Stumpfnah wurde E-Hand geschweißt. Nach dem Schweißen wurden die Prüfkörper (siehe Abb. 85 und Abb. 86) aus den Platten durch Sägen herausgetrennt.

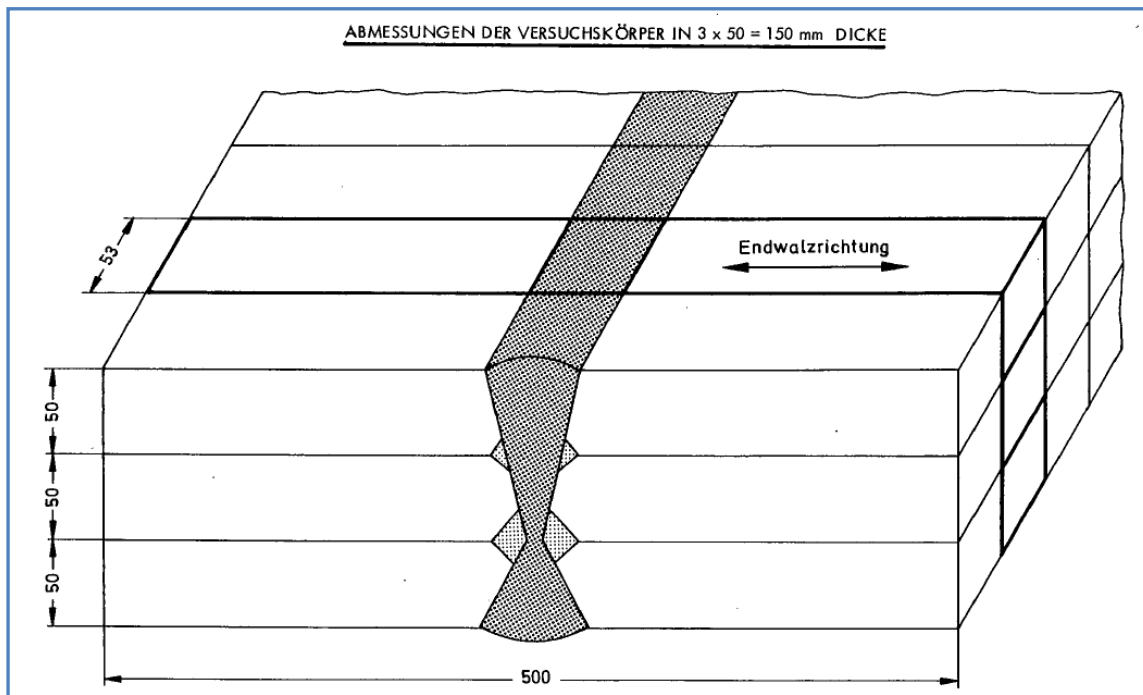


Abb. 85 Versuchskörper 3x50mm; Quelle: LBF Bericht 4879 [44]

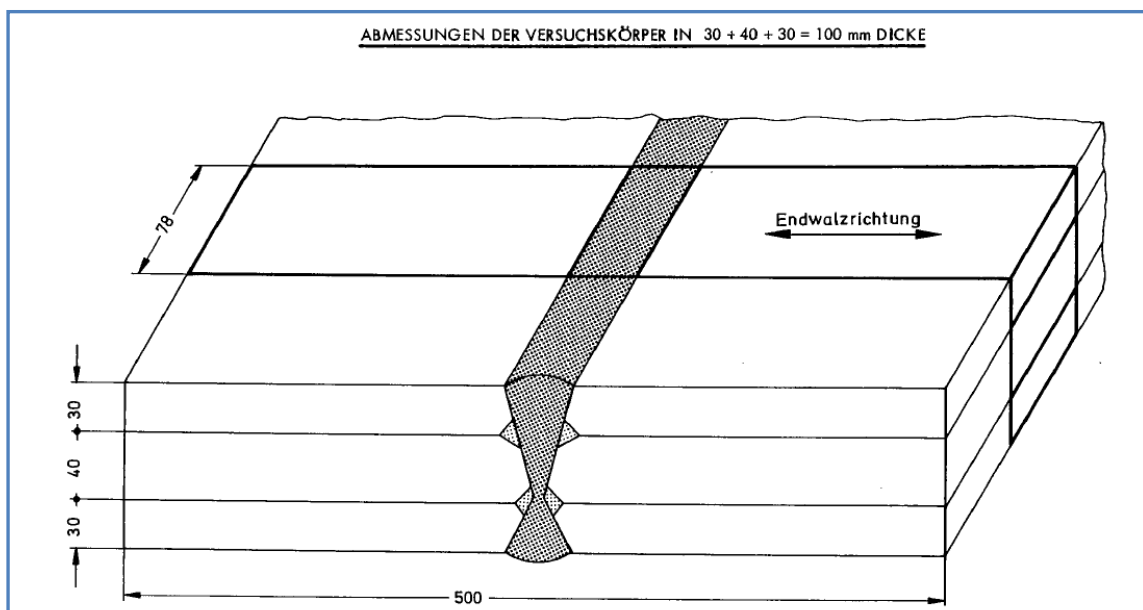


Abb. 86 Versuchskörper 30mm+40mm+30mm; Quelle: LBF Bericht 4879 [44]

Die Versuche wurden auf einer 2500kN servohydraulischen Prüfmaschine der Bauart Schenk durchgeführt. Die Prüfkraft wurde auf die Prüfkörper durch eine hydraulische Flachprobeneinspannung aufgebracht, die die Prüfkraft durch Reibschluss überträgt. Die Einspannung wirkt dabei auf die Seitenflächen der Prüfkörper. In den Tab. 30 bis Tab. 33 sind die Versuchsergebnisse dargestellt. Pro Versuchskörperabmessung wurden zwei Versuchsreihen mit einem konstanten Spannungsschwingverhältnis von $R=0$ und $R=-1$ durchgeführt.

Tab. 30 Ergebnisse Schwingversuche, St 37-2, 3x50mm, $R=-1$; Quelle: LBF 4879 [44]

R = -1		Blechabmessungen: 3x50mm		
Stab Nr.	Schwingbreite $\Delta\sigma$ [N/mm ²]	Lastspiele N [-]	Bruchausgang	Ausgewertet
20	320	50.700	Stirnfugennaht	X
7	240	138.100	Fehlstelle Stumpfnah	X
5	240	183.500	Einbrandgrenze, Anriss Stirnfugennaht	X
14	240	287.800	Stirnfugennaht	X
6	180	557.500	Einbrandgrenze, Anriss Stirnfugennaht	X
19	180	888.300	Einbrandgrenze, Anriss Stirnfugennaht	X
15	150	1.443.400	Einbrandgrenze, Anriss Stirnfugennaht	X
1	150	1.875.300	Stirnfugennaht	X

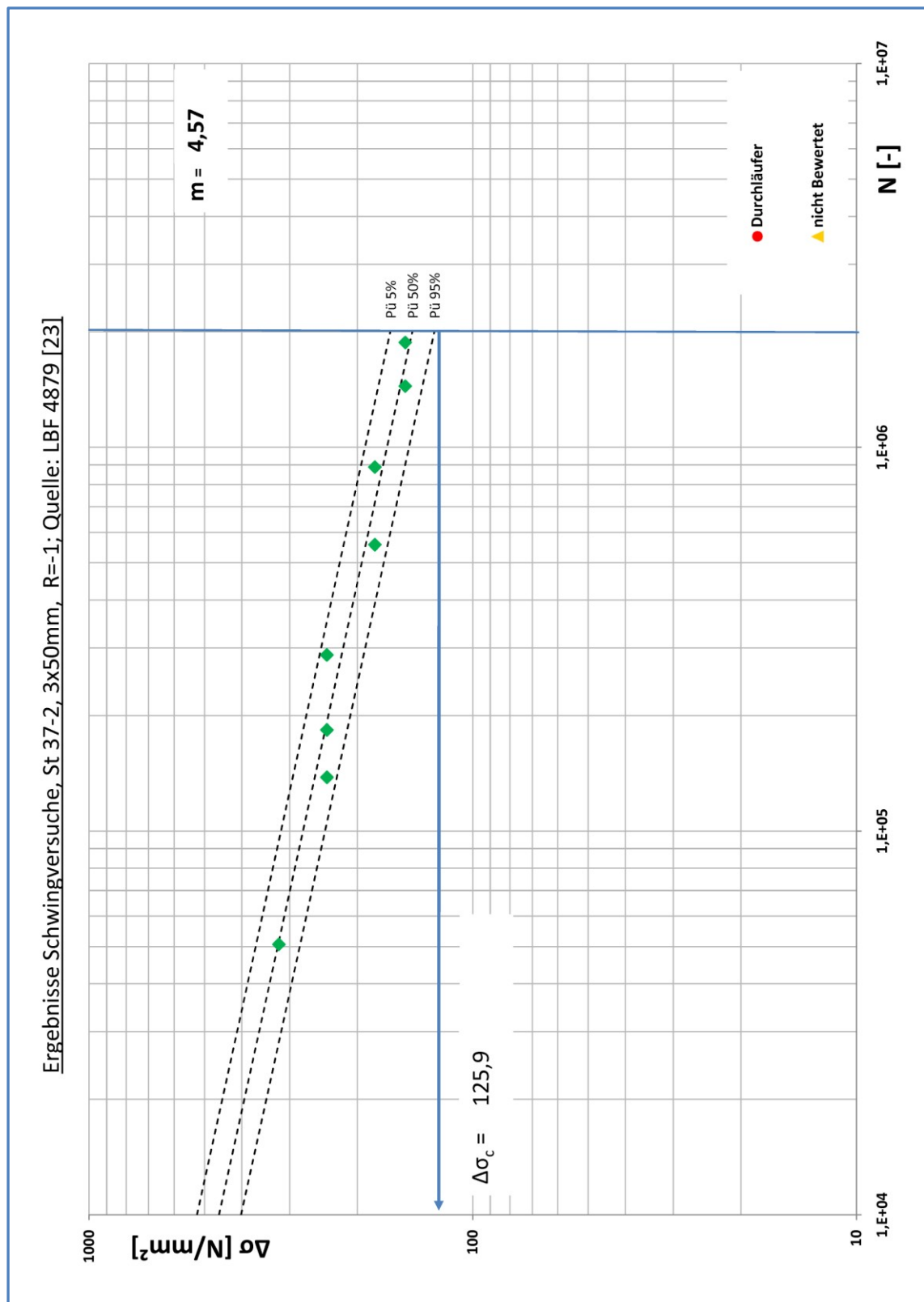


Abb. 87 Ergebnisse Schwingversuche, St 37-2, 3x50mm, R=-1, m=4,57; Quelle: LBF 4879 [44]

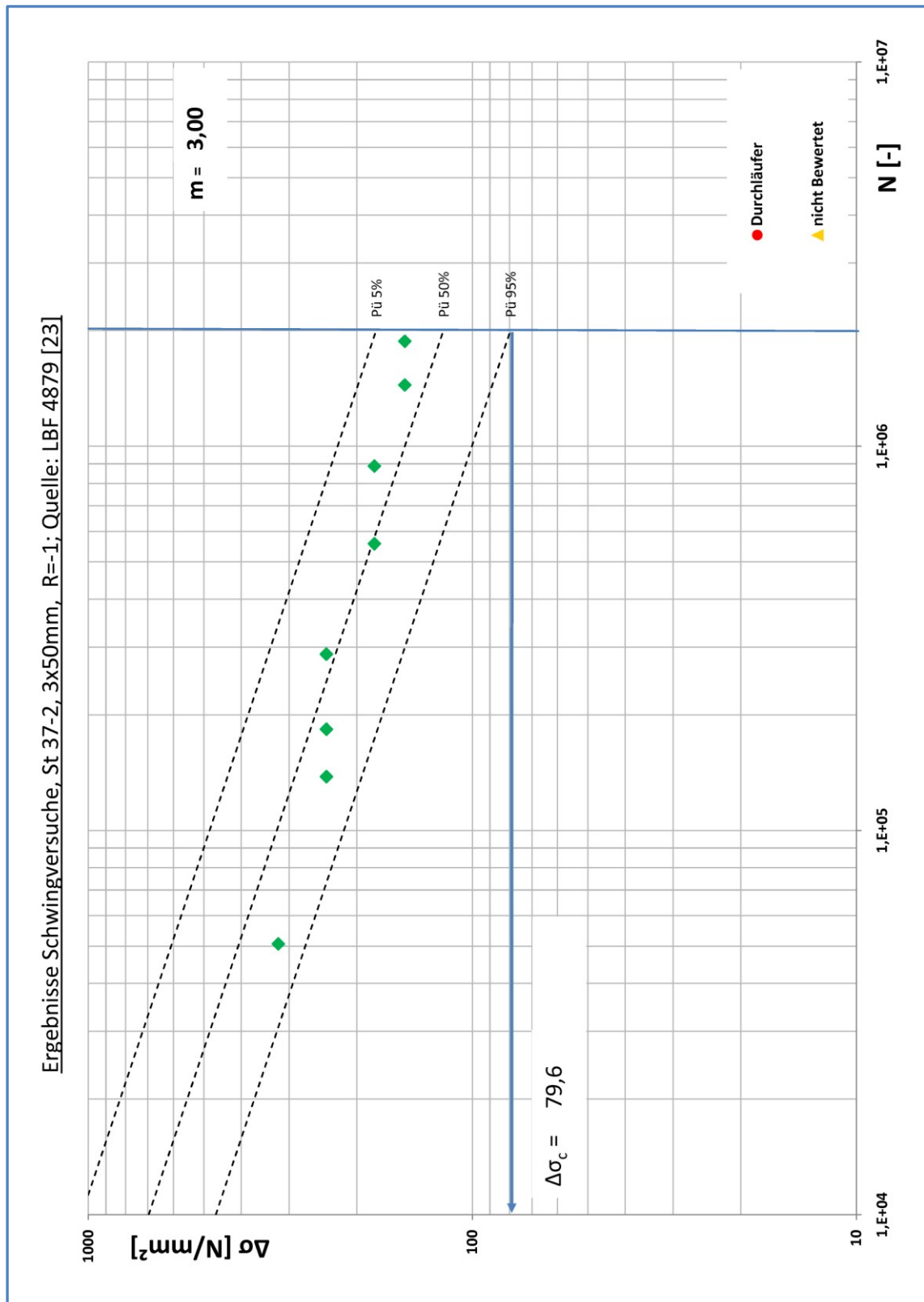


Abb. 88 Ergebnisse Schwingversuche, St 37-2, 3x50mm, R=-1, m=3; Quelle: LBF 4879 [44]

Tab. 31 Ergebnisse Schwingversuche, St 37-2, 3x50mm, R= 0; Quelle: LBF 4879 [44]

R = 0		Blechabmessungen: 3x50mm		
Stab Nr.	Schwingbreite $\Delta\sigma$ [N/mm ²]	Lastspiele N [-]	Bruchausgang	Ausgewertet
10	180	131.800	Fehlstelle Stumpf-, Anriss Stirnfugennaht	
9	180	133.700	Fehlstelle Stumpf-, Anriss Stirnfugennaht	
13	180	511.000	Stirnfugennaht	X
3	180	594.600	Fehlstelle Stumpfnah	X
18	150	1.168.800	Einbrandgrenze, Anriss Stirnfugennaht	X
4	150	1.525.500	Stirnfugennaht	X
17	120	6.650.700	Fehlstelle Stumpfnah	

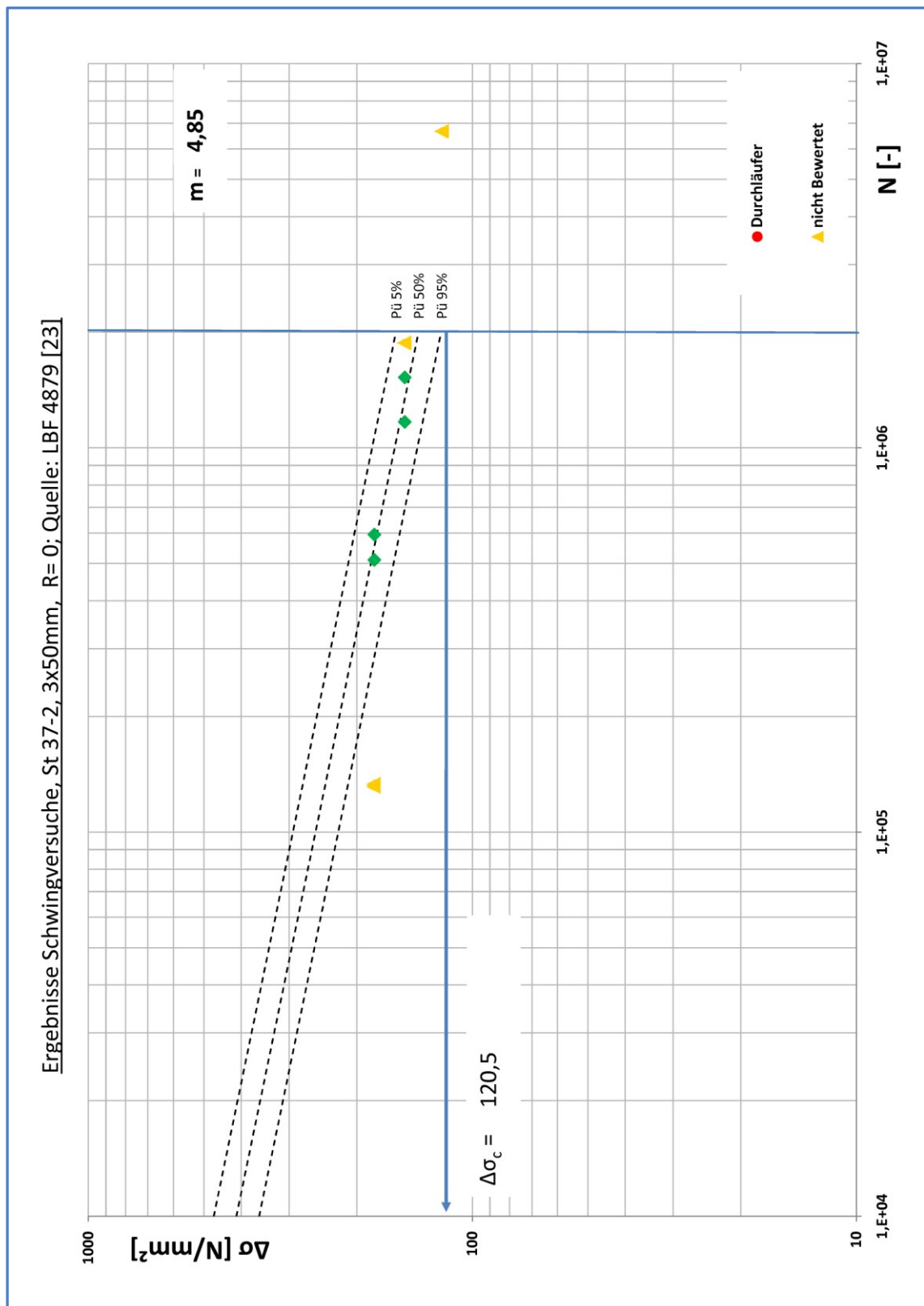


Abb. 89 Ergebnisse Schwingversuche, St 37-2, 3x50mm, R=0, m=4,85; Quelle: LBF 4879 [23]

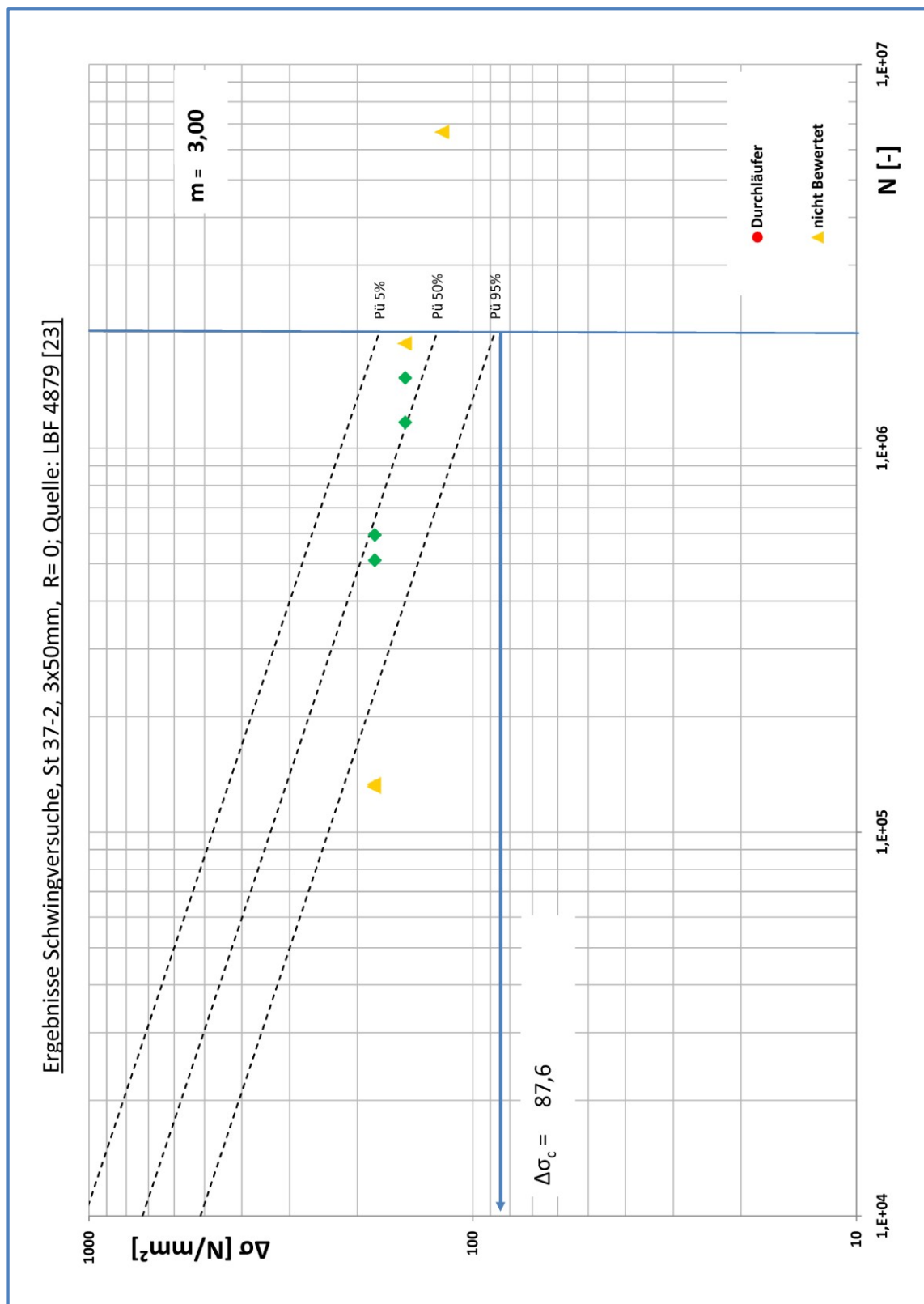


Abb. 90 Ergebnisse Schwingversuche, St 37-2, 3x50mm, R=0, m=0; Quelle: LBF 4879 [44]

Tab. 32 Ergebnisse Schwingversuche, St 37-2, 30mm+40mm+30mm , R=-1; Quelle: LBF 4879 [44]

R = -1		Blechabmessungen: 30mm + 40mm + 30mm		
Stab Nr.	Schwingbreite $\Delta\sigma$ [N/mm ²]	Lastspiele N [-]	Bruchausgang	Ausgewertet
8	240	144.300	Stirnfugennaht, Anriss Einbrandkerbe	X
7	240	151.300	Stirnfugennaht	X
14	180	340.400	Stirnfugennaht, Anriss Einbrandkerbe	X
20	180	455.000	Stirnfugennaht	X
13	150	769.000	Stirnfugennaht	X
9	150	861.500	Stirnfugennaht	X
17	120	4.835.700	Stirnfugennaht, Anriss Einbrandkerbe	

Tab. 33 Ergebnisse Schwingversuche, St 37-2, 30mm+40mm+30mm , R=0; Quelle: LBF 4879 [44]

R = 0		Blechabmessungen: 30mm + 40mm + 30mm		
Stab Nr.	Schwingbreite $\Delta\sigma$ [N/mm ²]	Lastspiele N [-]	Bruchausgang	Ausgewertet
12	180	251.000	Stirnfugennaht, Anriss Einbrandkerbe	X
19	180	271.400	Stirnfugennaht	X
16	180	294.900	Stirnfugennaht	X
3	150	417.400	Stirnfugennaht	X
11	150	448.300	Stirnfugennaht, Anriss Einbrandkerbe	X
5	150	486.300	Stirnfugennaht	X
6	120	798.700	Stirnfugennaht, Anriss Einbrandkerbe	X
10	120	901.700	Stirnfugennaht, Anriss Einbrandkerbe	X
4	100	1.699.600	Stirnfugennaht, Anriss Einbrandkerbe	X

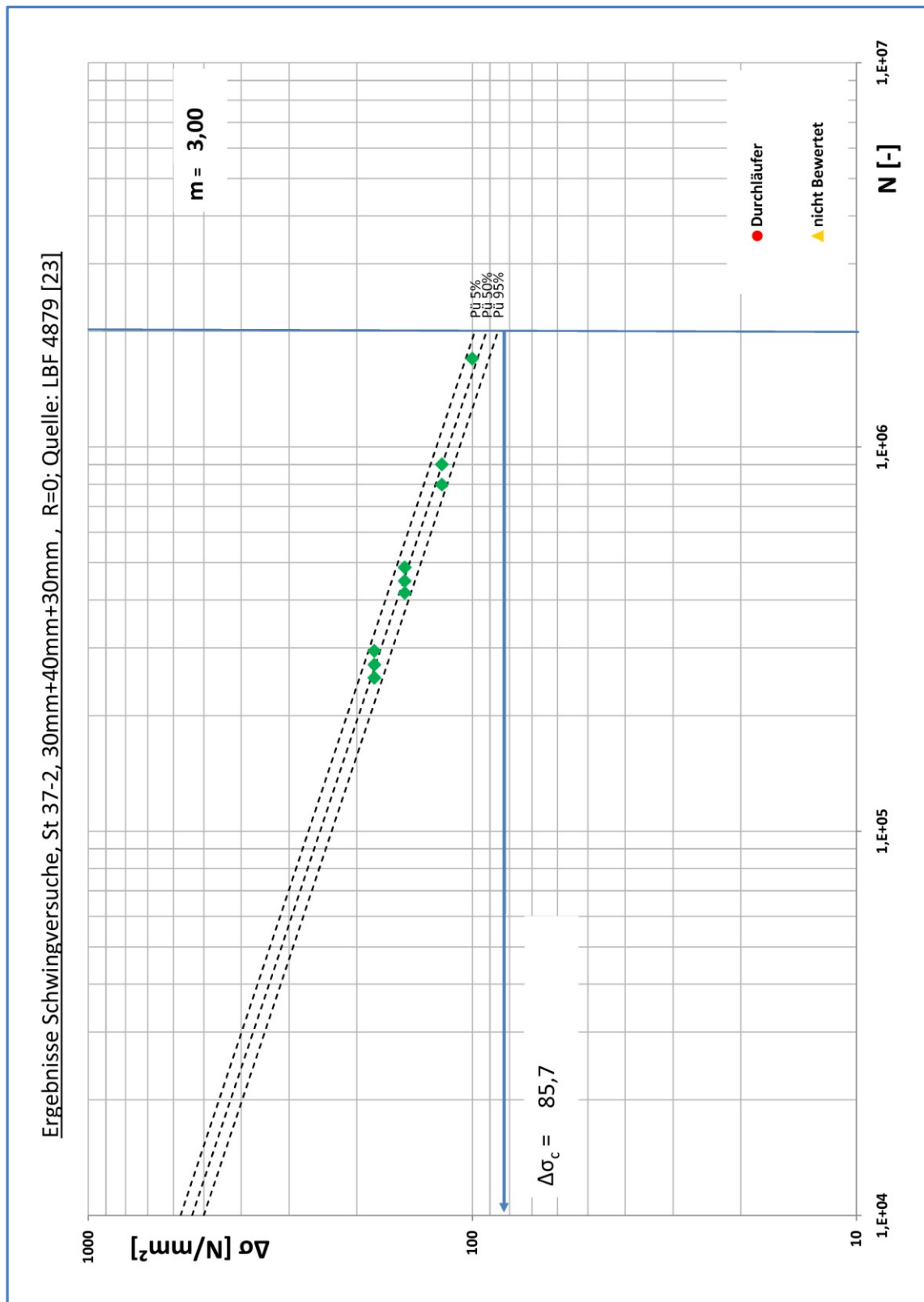


Abb. 91 Ergebnisse Schwingversuche, St 37-2, 30mm+40mm+30mm , R=-1, M=3; Quelle: LBF 4879 [44]

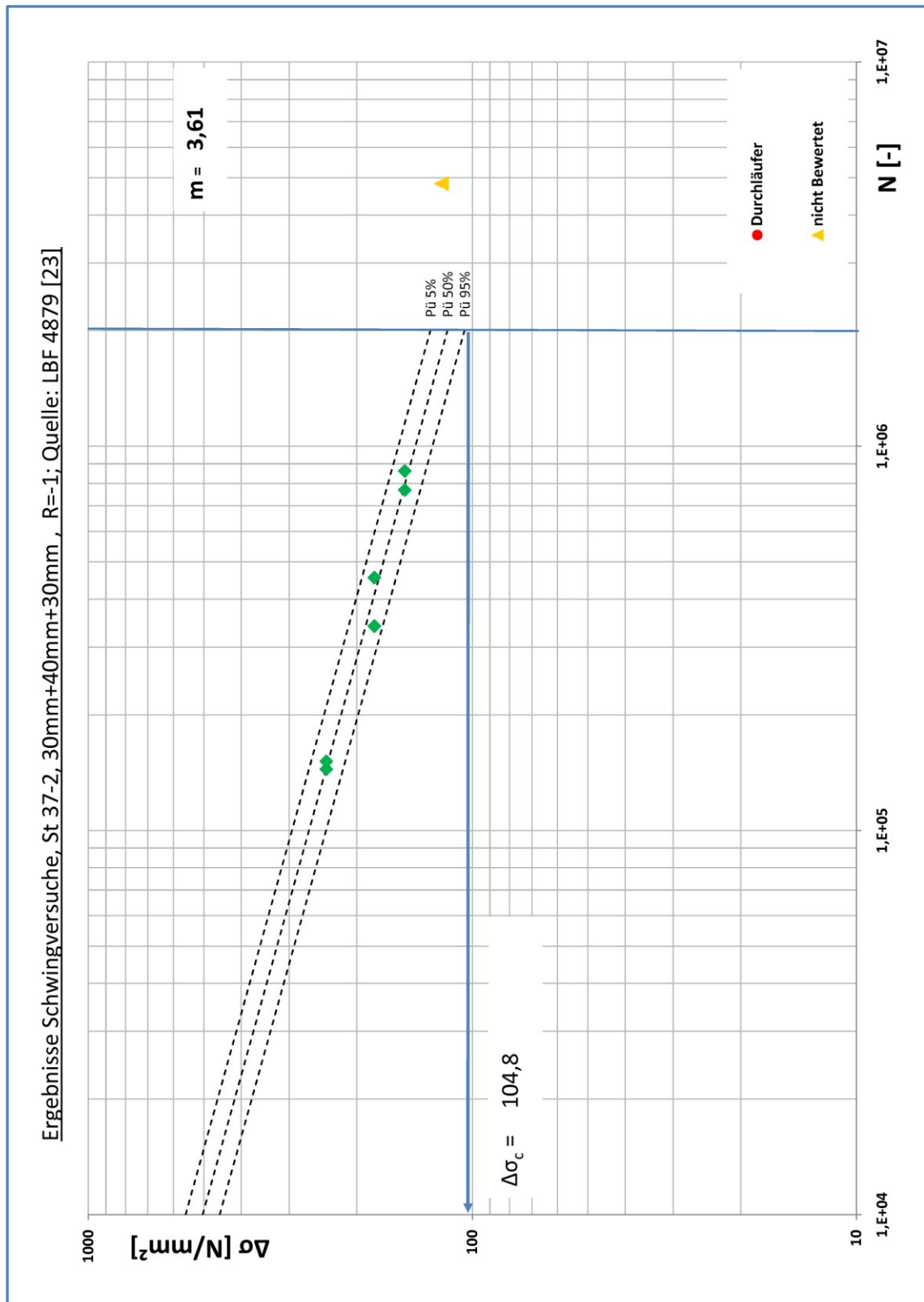


Abb. 92 Ergebnisse Schwingversuche, St 37-2, 30mm+40mm+30mm, R=-1, m=3,61; Quelle: LBF 4879 [44]

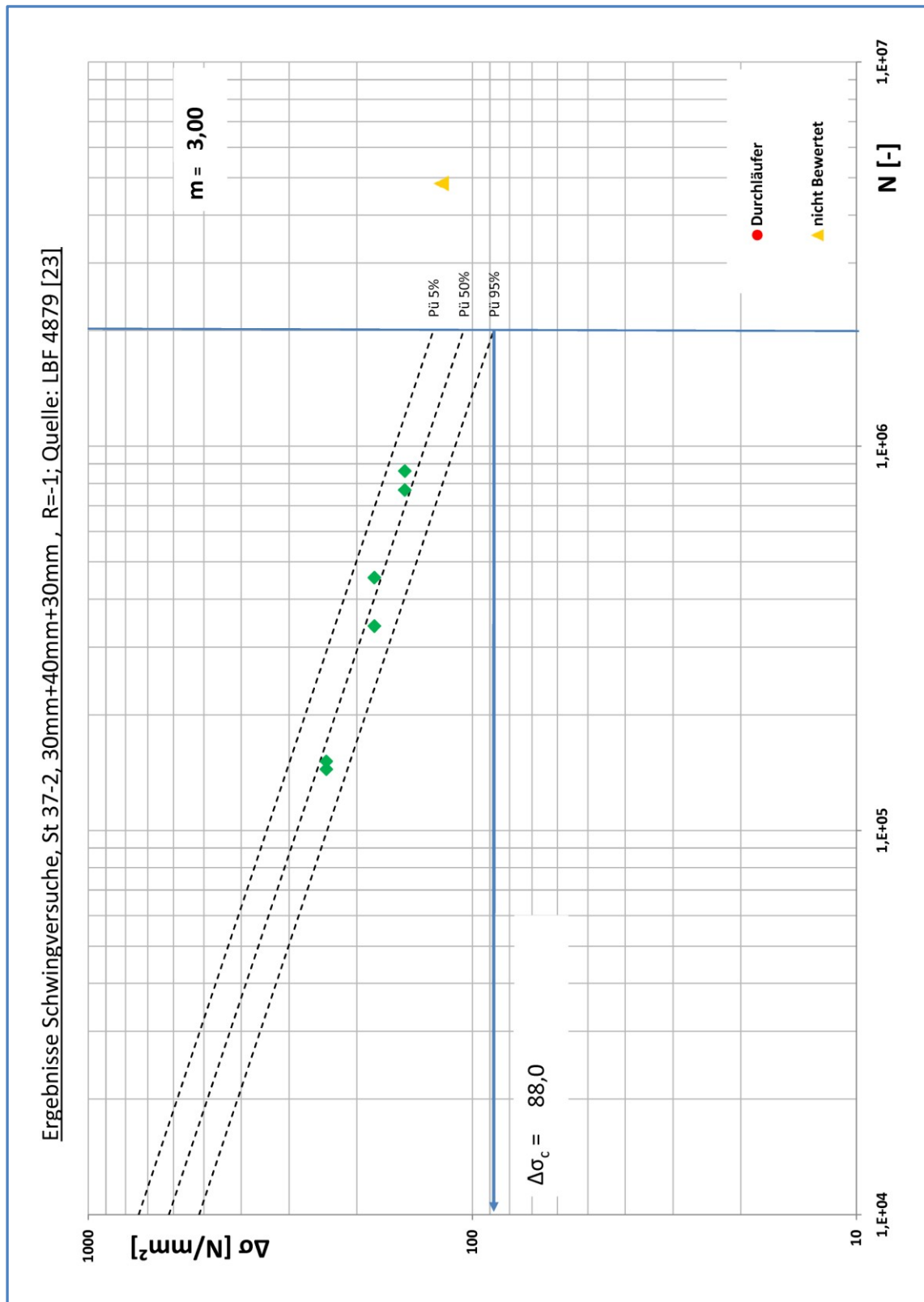


Abb. 93 Ergebnisse Schwingversuche, St 37-2, 30mm+40mm+30mm, R=-1, m=3; Quelle: LBF 4879 [44]

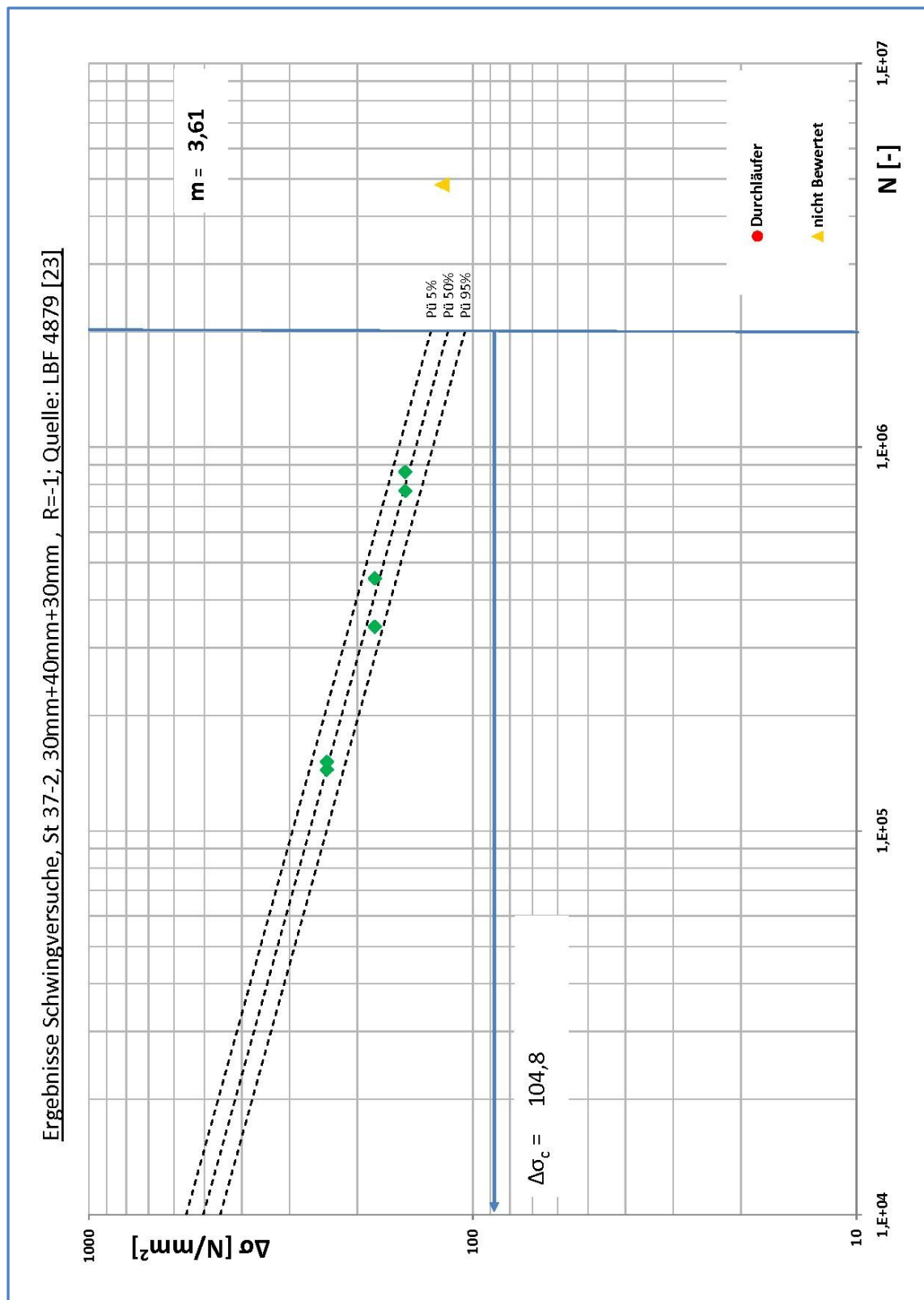


Abb. 94 Ergebnisse Schwingversuche, St 37-2, 30mm+40mm+30mm, R=-1, m=3,61; Quelle: LBF 4879 [44]

8.3. BAM Bericht 164

Vom Bundesamt für Materialforschung und -prüfung (BAM) wurden 1989 Versuche zur Überprüfung von Festigkeitswerten in technischen Regelwerken durchgeführt. Die Ermüdungsfestigkeiten wurden an großen geschweißten Blechträgern ermittelt. Diese Träger wurden in der Werkstatt gefertigt. Die Trägerstöße wurden nach der in Abb. 95 dargestellten Form unter Baustellenbedingungen geschweißt. Die Trägergeometrie war so ausgelegt, dass im Montagestoß ein Übergang von einem auf zwei Gurtbleche erfolgt. Es ergibt sich somit ein Stumpfstoß, der auf einer Seite eine Stirnfugennaht enthält. Die Ermüdungsversuche wurden als Trägerversuche unter Biegewechselbeanspruchung durchgeführt. Die Biegewechselversuche wurden nach dem Prinzip der Resonanzregung bei einer Schwingfrequenz von ca. 30Hz durchgeführt. Durch diesen Versuchsaufbau wurde das Schweißdetail im Ober- und Untergurt auf Zug belastet. Als Abbruchkriterium galt ein Sichtbarwerden des Anrisses. Es sind keine Angaben über das Verhalten der Stirnfugennaht unter Ermüdung im Bericht zu finden. Die Ergebnisse sind in Tab. 34 dargestellt. Die Auswertung nach Abs. 2.2 zeigt die Abb. 96 und Abb. 97.

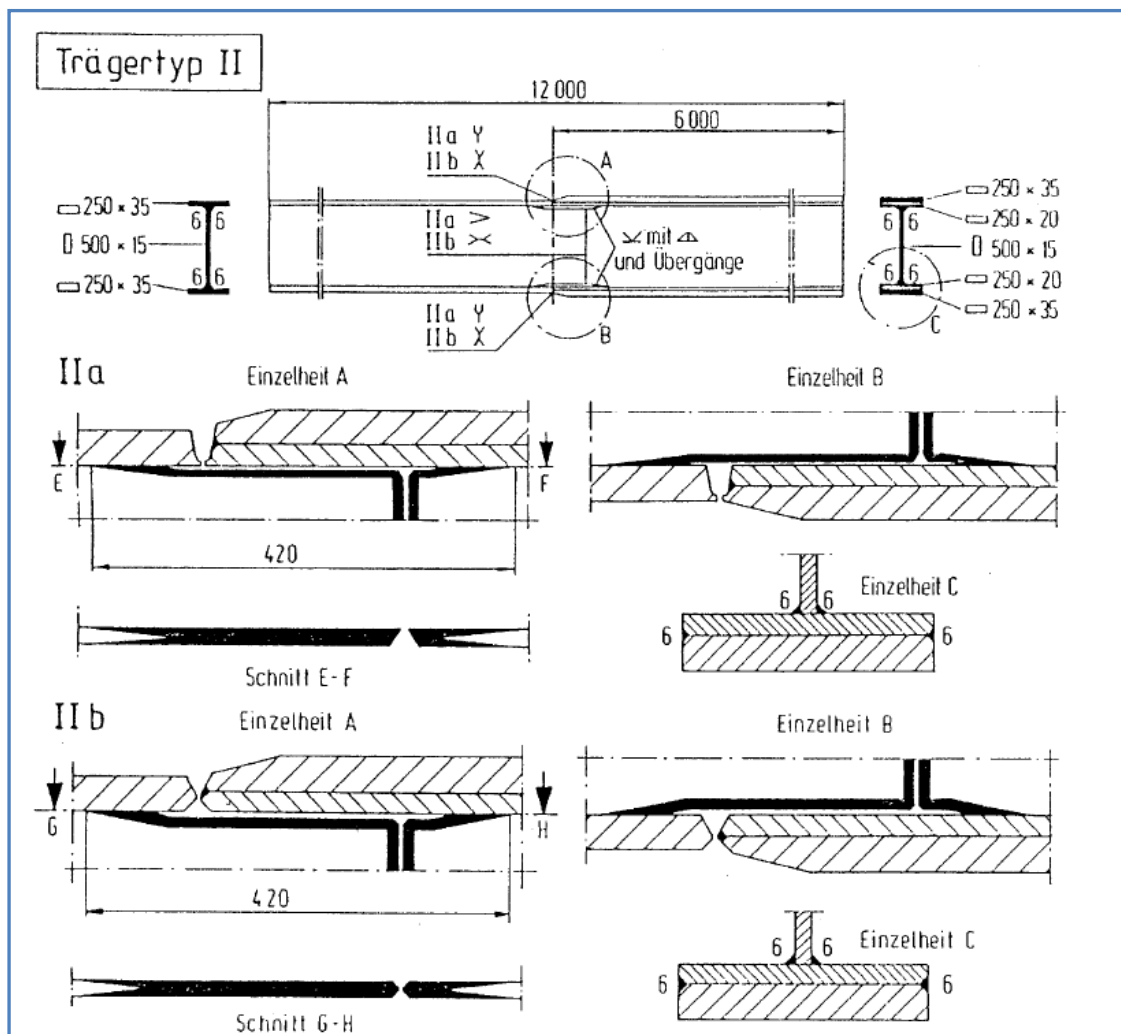


Abb. 95 Schweißnahtdetails, Schwingversuche BAM 164 [46]

Tab. 34 Ergebnisse Schwingversuche, St 37-2, 35mm+25mm , R=-1; Quelle: BAM 164 [46]

R = -1		Blechabmessungen: 35mm + 25mm	
Stab Nr.	Schwingbreite $\Delta\sigma$ [N/mm ²]	Lastspiele N [-]	Schweißnahttyp
1	157	1.700.000	Naht IIa = U-Naht
2	202	370.000	Naht IIa = U-Naht
3	157,4	1.500.000	Naht IIa = U-Naht
4	148	490.000	Naht IIa = U-Naht
5	148	640.000	Naht IIa = U-Naht
6	138	760.000	Naht IIa = U-Naht
7	178	950.000	Naht IIa = U-Naht
8	157	1.100.000	Naht IIa = U-Naht
9	198,2	980.000	Naht IIa = U-Naht
10	157,4	1.370.000	Naht IIa = U-Naht
11	200	300.000	Naht IIa = U-Naht
12	178	900.000	Naht IIb = X-Naht
13	148	580.000	Naht IIb = X-Naht
14	148	840.000	Naht IIb = X-Naht
15	138	1.110.000	Naht IIb = X-Naht
16	138	1.140.000	Naht IIb = X-Naht

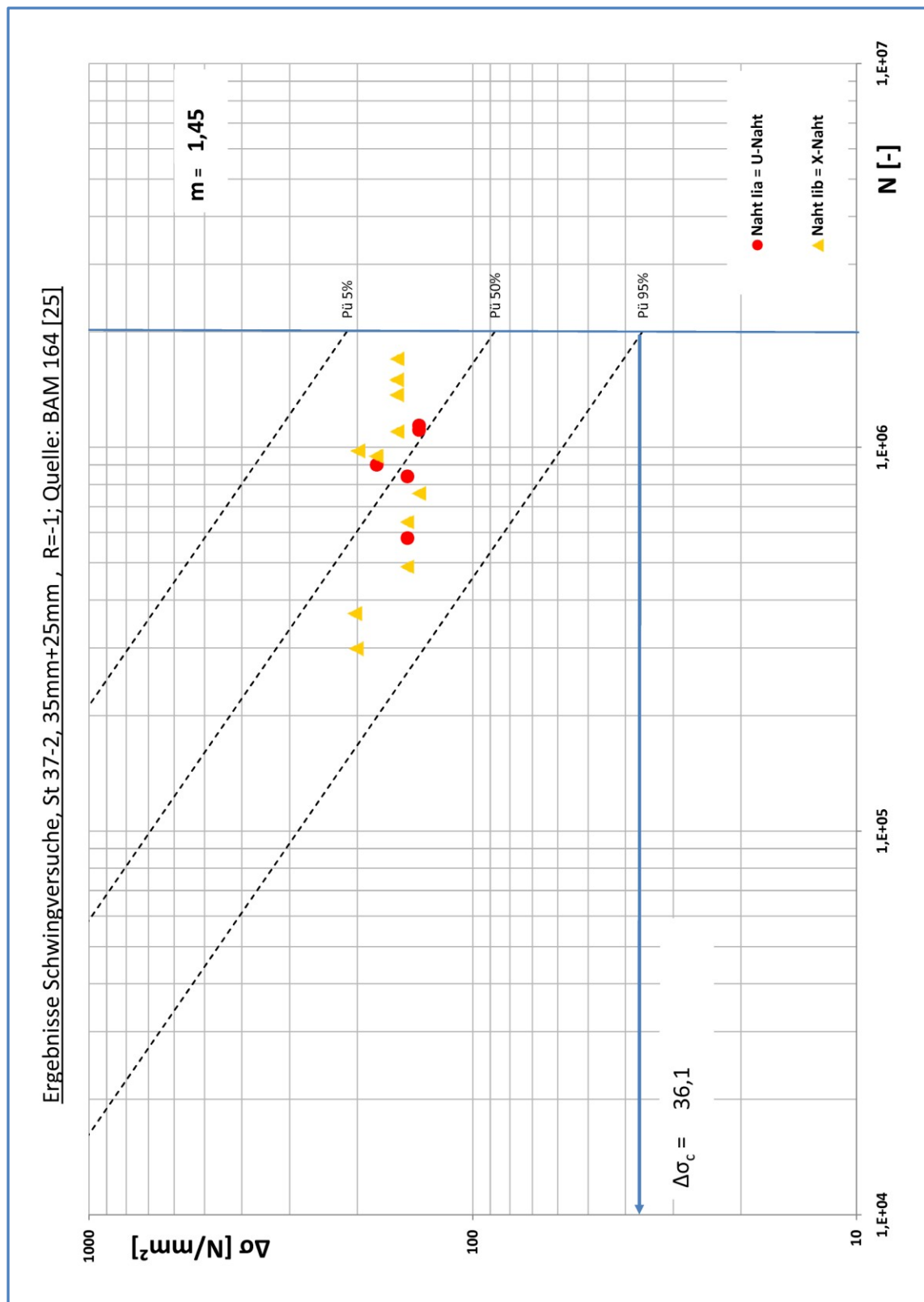


Abb. 96 Ergebnisse Schwingversuche, St 37-2, 35mm+25mm , R=-1, m=1,45; Quelle: BAM 164 [46]

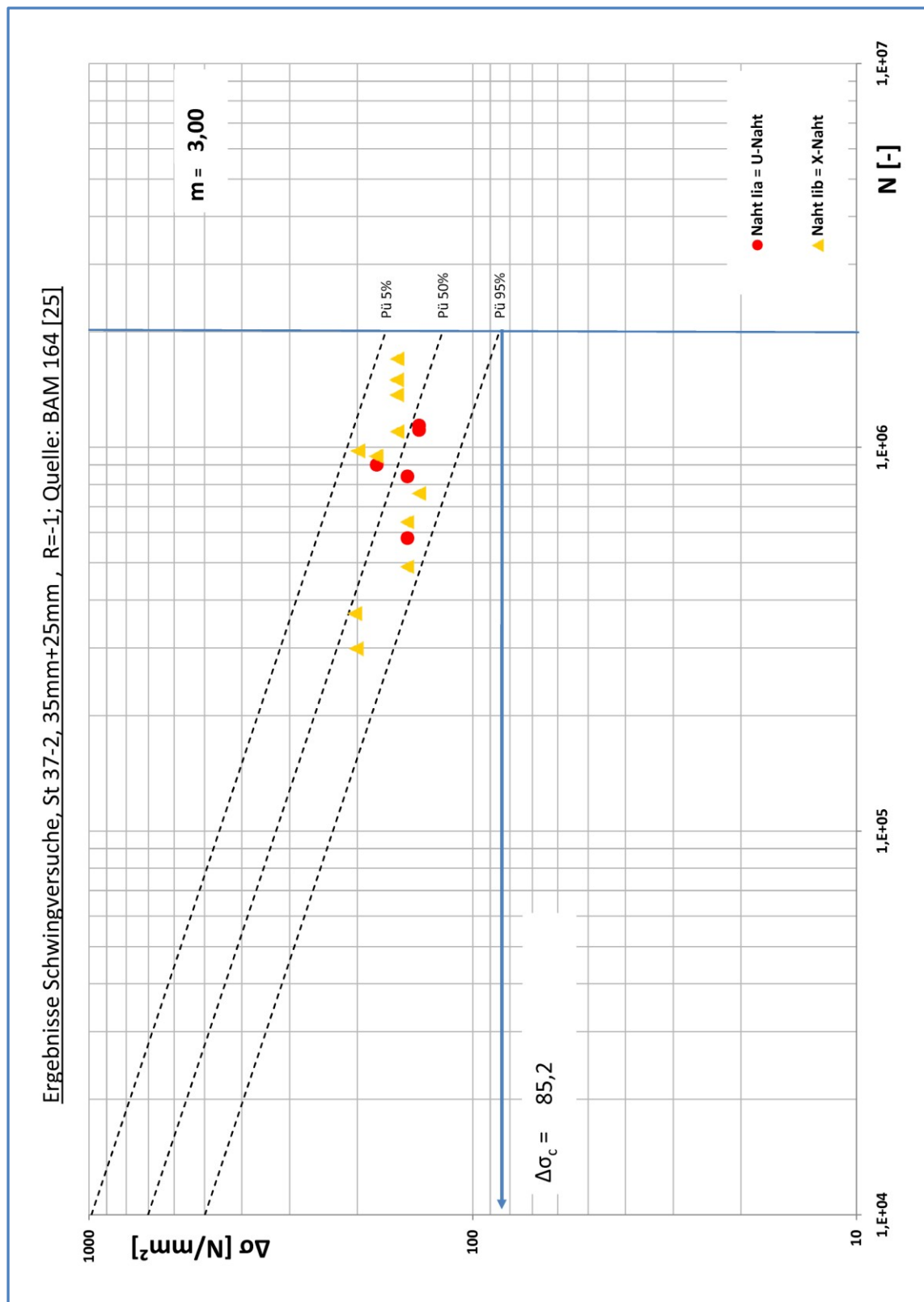


Abb. 97 Ergebnisse Schwingversuche, St 37-2, 35mm+25mm , R=-1, m=3; Quelle: BAM 164 [46]

9. Zusammenfassung der Ergebnisse sowie ein Ausblick weiteren Forschungsbedarf

In der hier vorliegenden Arbeit wurde durch die Zusammenstellung und Auswertung der aktuellen Regelwerke gezeigt, dass die Bemessung des Lamellenstoßes auf Ermüdung durch die Regelwerke DIN EN 1993-1-9 [3] sowohl auch durch den DIN Fachbericht 103 [31] unzureichend geregelt ist.

Durch den Passus in der DIN EN 1993-1-9 [3] ist es möglich, die Kerbfalltabellen durch Ermüdungsversuche um nicht aufgeführte Kerbdetails zu erweitern. Werden diese Versuchsergebnisse durch das Hintergrund Dokument zur DIN EN 1993-1-9 [22] ausgewertet, können auch nicht aufgeführte Kerbdetails durch das Nennspannungskonzept bemessen werden. In dieser Arbeit wurden Ermüdungsversuche durchgeführt und nach den im Hintergrund Dokument [22] festgelegten Methoden ausgewertet. Mit dieser ermittelten zulässigen Spannungsschwingbreite kann der Lamellenstoß der Brücke Lochkov auf Ermüdung nach der DIN EN 1993-1-9 [3] bemessen werden. Alle ausgewerteten Ergebnisse sind im Anhang G in einer Tabelle zusammengefügt.

Bereits vor der Erstellung dieser Arbeit lag ein Gutachten der RWTH Aachen vor. In diesem wird vorgeschlagen die Stumpfnah und die Stirnfugennah im Lamellenstoß getrennt zu betrachten. Für die Stumpfnah wird eine reduzierte Spannungsschwingbreite unter Beachtung des Maßstabeffektes festgelegt.

$$\Delta\sigma_{c,red} = k_s * \Delta\sigma_c = (25/t)^{0,2} * \Delta\sigma_c = (25/190)^{0,2} * 112 \text{ N/mm}^2$$

$$\Delta\sigma_{red} = \underline{74,70 \text{ N/mm}^2}$$

Die Betrachtung der Stirnfugennah erfolgt dort mit folgender Begründung:

„[...] Die in der Werkstatt ausgeführte Stirnfugennah verbindet die Blechlamellen für die Montage, dient aber nicht der Lastabtragung. [...] Da allerdings die Ermüdungsbeanspruchung der Blechlamellen in Längsrichtung orientiert ist und eine Belastung senkrecht zur Blechebene nicht vorliegt, sowie aufgrund der geometrischen Ausbildung keine Spannungskonzentration vor der Wurzel der Schweißnah auftritt, kann davon ausgegangen werden, dass an der Wurzel der Stirnfugennah eine Rissindizierung nicht stattfindet.[...]“ [47]

Somit wird für die Kerbfalleinteilung der Kerbfall 71 vorgeschlagen, dieser Vorschlag wird durch die Kerbfalleinteilung für den Lamellenstoß im DIN Fachbericht 103 [31] gestützt, dort ist für den Lamellenstoß der Kerbfall 71 festgelegt. Der Verfasser dieser Arbeit ist der Meinung, dass an dieser Stelle noch der Maßstabeffekt der im DIN Fachbericht 103 [31] für Schweißnähte quer zu Beanspruchung vorgeschrieben ist, beachtet werden muss. Im DIN Fachbericht 103 [31] ist nicht festgelegt ob der Maßstabeffekt auf ein Blech oder auf das gesamte Blechpaket angewendet werden muss. Daraus ergeben sich drei Möglichkeiten für die Ermittlung der Spannungsschwingbreite.

1) Reduzierung mit der Blechstärke des Gesamtpaketes (190mm)

$$\Delta\sigma_{c,red} = k_s * \Delta\sigma_c = (25/t)^{0,25} * \Delta\sigma_c = (25/190)^{0,25} * 71 \text{ N/mm}^2$$

$$\underline{\Delta\sigma_{red} = 42,76 \text{ N/mm}^2}$$

2) Reduzierung mit der Blechstärke des dickere Bleches (100mm)

$$\Delta\sigma_{c,red} = k_s * \Delta\sigma_c = (25/t)^{0,25} * \Delta\sigma_c = (25/100)^{0,25} * 71 \text{ N/mm}^2$$

$$\underline{\Delta\sigma_{red} = 50,20 \text{ N/mm}^2}$$

3) Reduzierung mit der Blechstärke des dünneren Bleches (90mm)

$$\Delta\sigma_{c,red} = k_s * \Delta\sigma_c = (25/t)^{0,25} * \Delta\sigma_c = (25/90)^{0,25} * 71 \text{ N/mm}^2$$

$$\underline{\Delta\sigma_{red} = 51,54 \text{ N/mm}^2}$$

Nach den hier neu gewonnen Erkenntnissen muss auch die Sachlage mit der Stirnfugennaht neu hinterfragt werden, da die Rissinitiierung in Längsrichtung der Schweißnaht orientiert ist und somit auch eine Spannungskonzentration an der Wurzel vorliegt und unter Ermüdungsbelastung der Risse quer zur Normalspannung im Grundwerkstoff anwachsen könnte.

Der Verfasser dieser Arbeit schlägt vor, zur Bemessung die ermittelte Wöhlerkurve zu verwenden, die für den ersten technischen Anriss ermittelt wurde. Dies entspricht einer zulässigen Spannungsschwingbreite von $\Delta\sigma_c = 64 \text{ N/mm}^2$. Dieses Ergebnis wurde beim ersten sichtbar werden eines technischen Anriss ermittelt.

Im IIW-Dokument [17] ist vorgeschlagen die zulässige Spannungsschwingbreite zu korrigieren, wenn diese an Prüfkörpern ermittelt wurde, die eine kleinere Eigenspannung aufweisen als die später im Bauwerk vorhandene Eigenspannung. Da bei der Entnahme der Versuchskörper der Eigenspannungszustand quer zur Schweißnaht nicht verändert wurde, rät der Verfasser davon ab, die hier durch Versuche ermittelte Spannungsschwingbreite zu reduzieren.

Der hier untersuchte Lamellenstoß mit der maßgebenden Blechdicke von 190mm entspricht dem ausgeführten Lamellenstoß der Brücke Lochkov und stellt sehr realistisch die Baustellenbedingungen dar. Da die Versuchsergebnisse am Lamellenstoß mit der größten Blechdicke ermittelt wurden, kann die zulässige Spannungsschwingbreite auch zur Bemessung der Lamellenstöße mit kleineren Blechdicken im Bauwerk angewendet werden. Da zur Bemessung der Wert durch den Maßstabeffektes angehoben werden könnte, erfolgt somit an diesen Stellen die Bemessung mit einer zulässigen Spannungsschwingbreite, die für dieses Detail größer ausfallen könnte und somit auf der sicheren Seite liegt.

Zur Bewertung der hier ermittelten Spannungsschwingbreite, sollten die Ergebnisse der zu dieser Arbeit durchgeführten Kleinversuche hinzugezogen werden. Es ist ersichtlich, dass durch die Stirnfugennaht ein sehr geringer Kerbeeinfluss vorliegt. Diese Ergebnisse wurden ebenfalls an Proben aus dem Musterstück I erzielt. Dabei ist allerdings zu beachten, dass durch die Wegnahme eines großen Anteils der Schweißnaht der Eigenspannungszustand im Prüfkörper gegenüber den Versuchskörpern für die Großversuche verändert wurde. Da bei den im Zusammenhang dieser Arbeit durchgeführten Versuchen nur wenige vergleichbare Ergebnisse erzielt wurden, ist eine statistische Auswertung und somit eine sichere Bestimmung der Spannungsschwingbreite nicht ohne weiteres möglich. Aus diesem Grund können die Ergebnisse nur zur Bewertung der Ergebnisse aus den Großversuchen herangezogen werden. Da an den Großversuchskörpern kein Risswachstum an der Wurzel der Stirnfugennaht festgestellt wurde bestätigen die Kleinversuche, dass durch die Stirnfugennaht eine geringe Kerbwirkung vorliegt und das Ermüdungsversagen in diesem Schweißstoß durch den Dickensprung hervorgerufen wird.

Bei den Versuchsergebnissen aus den Großversuchen ist zu beachten, dass durch den Dickensprung eine Änderung im Spannungsverlauf vorhanden ist, die so in einem Lamellenstoß ohne Dickensprung nicht vorhanden wäre. Dieser Spannungszustand führt zu einer Spannungserhöhung an der Unterseite der Schweißnaht, begünstigt durch die Kerbwirkung der Schweißnaht treten an dieser Stelle die Ermüdungsrisse auf. Betrachtet man den Spannungsverlauf im Lamellenstoß der Brücke Lochkov, so ist festzustellen, dass auf Grund des angenommenen linearen Spannungsverlaufes im Brückenquerschnitt an der Unterseite der Stoßstelle eine geringere Spannung gegenüber der Oberseite vorliegt.

In der Abb. 98 sind sowohl der Spannungsverlauf aus dem Versuchsaufbau, als auch der aus der Statik der Brücke Lochkov entnommene Spannungsverlauf im Lamellenstoß dargestellt. In dieser Darstellung ist auch die theoretische Spannungserhöhung aus der lokalen Kerbwirkung dargestellt. Der Verfasser geht davon aus, dass durch den Spannungsverlauf in der Brücke Lochkov die Spannungsspitze an der Unterseite geringer ausfällt als die lokale Spannungsspitze, die an der Unterseite durch den Dickensprung hervorgerufen wird. Der Spannungsverlauf kann nur durch weitere Untersuchungen präzisiert werden. Diese Untersuchungen sind nicht Bestandteil dieser Arbeit. Da in der Brücke Lochkov der hier untersuchte Lamellenstoß nur um 56% ausgelastet ist, betrachtet der Verfasser den ungeklärten Spannungsverlauf als unkritisch.

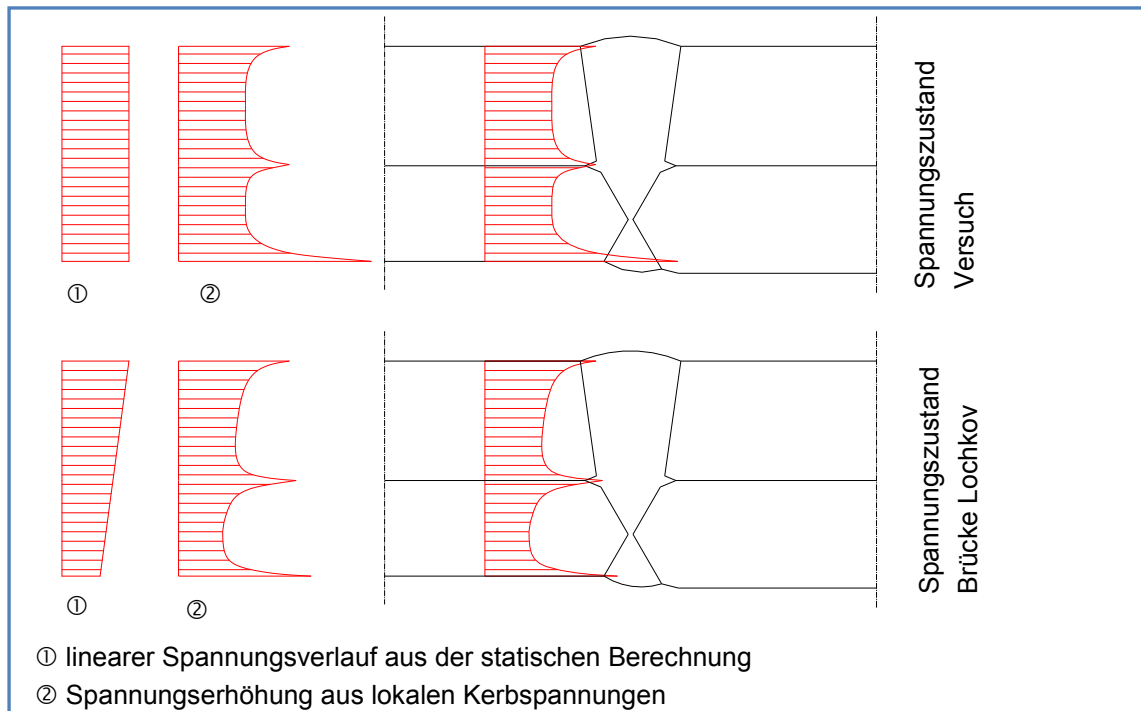


Abb. 98 Spannungserhöhung aus lokalen Kerbspannungen im Lamellenstoß; Quelle: eigene Darstellung

In der Brücke Lochkov wurden alle Lamellenstöße mit einer zulässigen Spannungsschwingbreite von 36 N/mm^2 bemessen. Die hier vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass die Lamellenstöße in der Talbrücke nur zu 56% ausgelastet sind und nach heutigen Erkenntnissen eine Bemessung durch das Nennspannungskonzept mit der hier ermittelten Spannungsschwingbreite möglich gewesen wäre. Desweiteren ist anzufügen, dass auch eine Bemessung nach der im DIN Fachbericht 103 [31] vorgeschriebene Kerbfalleinteilung möglich gewesen wäre, da die Kerbfalltabellen des DIN Fachberichtes 103 [31] der DIN EN 1993-1-9 [3] entnommen wurden [48]. Allerdings zeigt das Vorhandensein des Lamellenstoßes in den Kerbfalltabellen des DIN Fachberichtes 103 [31] und auch die nicht genau geregelte Anwendung des Maßstabeffekts, dass dies nicht konsequent durchgeführt wurde.

Durch die hier ermittelte Spannungsschwingbreite für den Lamellenstoß $100\text{mm}+90\text{mm}/100\text{mm}+80\text{mm}$ und die ermittelte Spannungsschwingbreite für den Lamellenstoß $2 \times 31,5\text{mm}$ aus dem LBF Bericht 3205 [27] kann ein Trend für den Maßstabseffekt abgeleitet werden. In der Abb. 99 wurden Versuchsergebnisse in ein Diagramm eingetragen, welches die Spannungsschwingbreite abhängig von der Blechdicke zeigt. Gestützt durch die beiden Versuchsergebnisse wurde in das Diagramm eine Kurve eingezeichnet, welche die Reduzierung der Spannungsschwingbreite bei $\Delta\sigma = 100 \text{ N/mm}^2$ durch den Maßstabseffekt bei einem $n = 0,2$ darstellt. Da diese Kurve den Versuchsergebnissen dieser Arbeit und dem LBF Bericht sehr nahe liegt, kann daraus abgeleitet werden, dass eine Kerbfalleinteilung in die FAT Klasse 100 als sinnvoll betrachtet werden kann. Das Thema Maßstabseffekt sollte noch abschließend durch gleichwertige Versuche geklärt werden, die für die Kurve weitere Stützpunkte liefern.

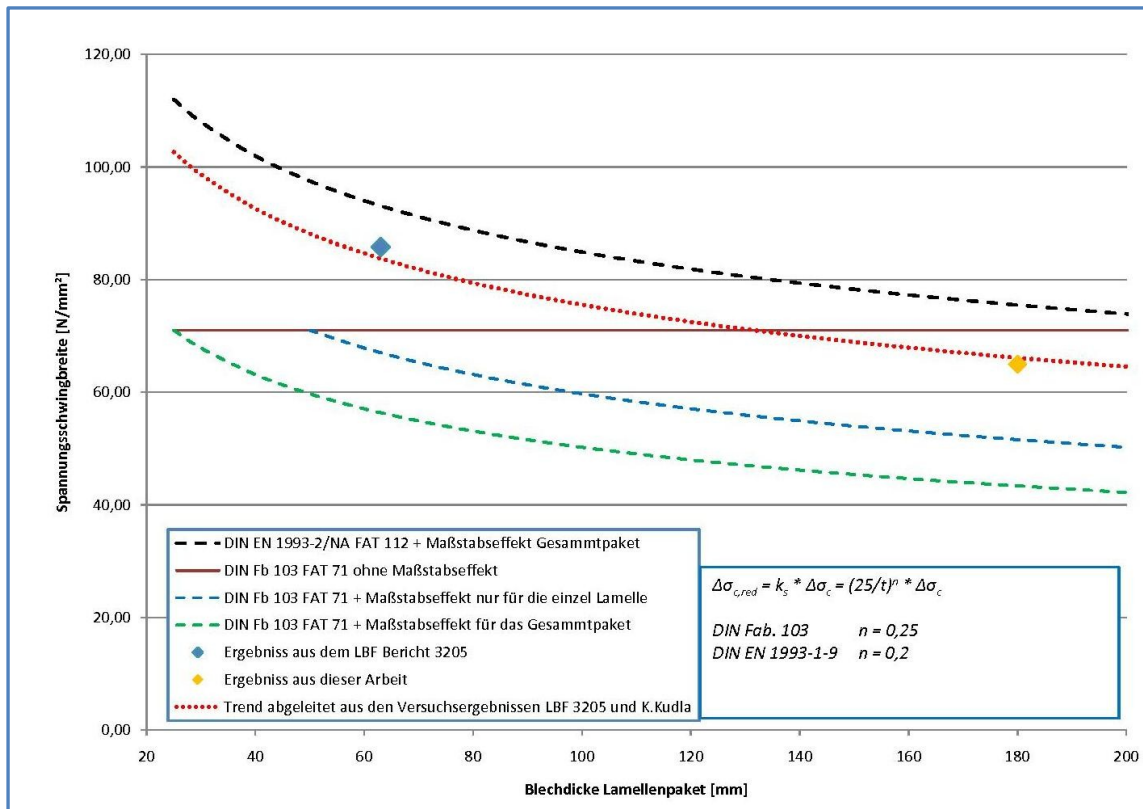


Abb. 99 Darstellung abgeleiteten Trend für den Maßstabeffekt aus den Ergebnissen LBF 3205 und den Ergebnissen dieser Arbeit; Quelle: eigenen Darstellung

In der Abb. 99 ist ebenfalls die zulässige Spannungsschwingbreite dargestellt, die nach dem aktuellen Entwurf der DIN EN 1993-2/NA [2] in Abhängigkeit der Blechstärke zum Nachweis des Lamellenstoßes auf Ermüdung herangezogen werden könnte. Im Entwurf steht bisher nur, dass der Maßstabeffekt auf das Kerbdetail berücksichtigt werden muss. Wie genau das zu erfolgen hat, ist noch nicht festgelegt. In der Darstellung wurde die Kurve durch die Abminderung für den Stumpfstoß auf die vorgegebene Spannungsschwingbreite für den Lamellenstoß dargestellt. Der Verfasser ist der Meinung, dass der Vorschlag im Entwurf der DIN EN 1993-2/NA [2] geprüft und die Angaben zum Maßstabeffekt präzisiert werden müssten. Ebenfalls hält er es für sinnvoll die Anwendung der Regel für den Maßstabeffekt auf den Lammellenstoß eindeutig im DIN Fachbericht 103 [31] festzulegen. Desweiteren macht der Verfasser den Vorschlag, die in der RIL 804 [25] festgelegten Ausführungshinweise sowohl in den DIN Fachbericht 103 [31] als auch in die DIN EN 1993-2 [32] zu übernehmen und diese Ausführungshinweise um ein zulässiges praxisnahes Maß für den Spalt zwischen den beiden Blechen vor dem Schweißen der Stirnfugennaht zu erweitern. Allerdings ist es zur Ermittlung des Spaltmaßes zwischen den Blechen erforderlich, ein weiteres Versuchsprogramm durchzuführen, welches die Einflüsse des Spaltes auf das Ermüdungsverhalten des Wurzelpunktes der Stirnfugennaht abbildet. Weiterhin sieht der Verfasser weiteren Forschungsbedarf für die in der Abb. 100 dargestellten Themen.

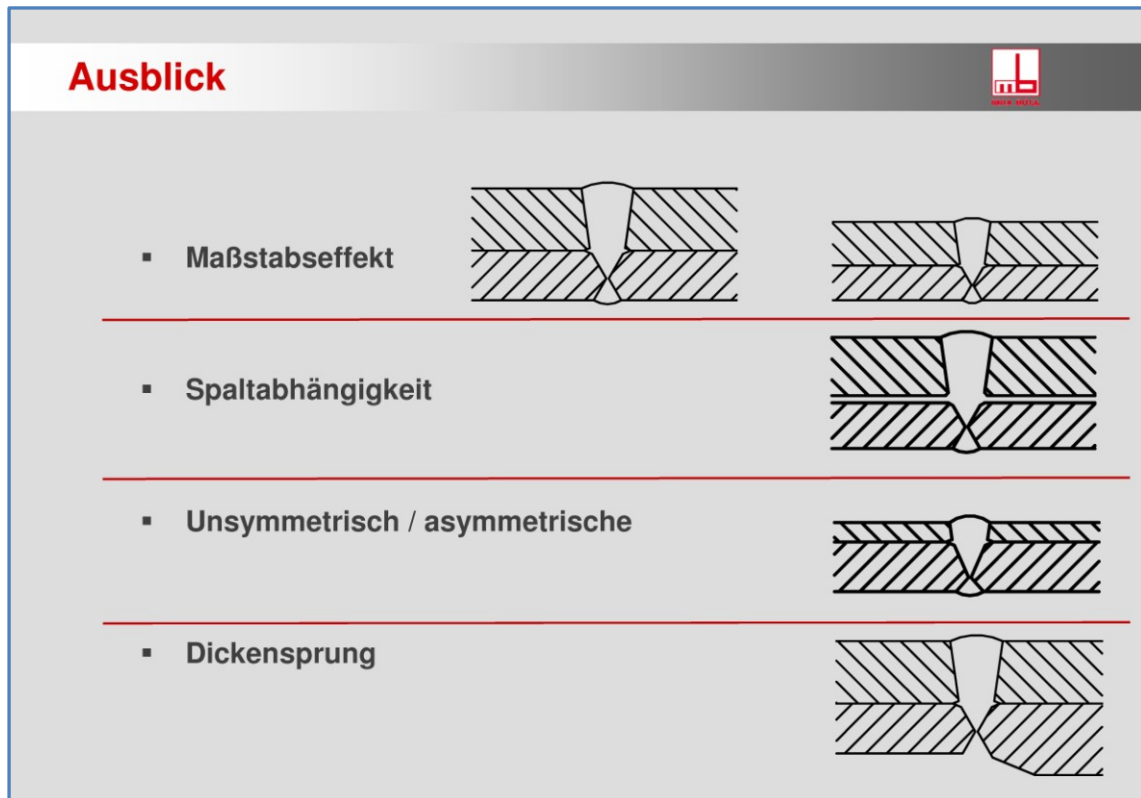


Abb. 100 Forschungsbedarf am Lamellenstoß; Quelle: [49]

Der Verfasser geht davon aus, dass bei Versuchen mit gleichen Blechabmessungen ohne Dickensprung der Kerbfall höher eingestuft werden kann als durch die hier erzielten Ergebnisse. Als ungeklärt sieht der Verfasser auch die Problematik des unsymmetrischen Lamellenstoßes, welcher in der Praxis häufig zur Anwendung kommt. Hier müsste geklärt werden, wie sich das Anrissverhalten am Wurzelpunkt der Stirnfugennaht verändert, wenn auf Grund eines dünneren Bleches näher an die Außenkante rutscht. Der Verfasser schlägt vor, diesen Einfluss durch die Kerbspannungsmethode abzudecken unter Verwendung eines FE-Modell durchzuführen, welches durch Messungen mit Dehnmessstreifen an vorhergegangenen Versuchen kalibriert wurde.

Auf Grundlage der gewonnen Forschungsergebnisse aus dem Forschungsprojekt 1F82C/012/910 des Verkehrsministerium der Technischen Republik wurde ein Bericht veröffentlicht (siehe Anhang H). In diesem Bericht wird die Schweißnaht des Lamellenstoßes als technologisch ausführungsaufwendig bewertet. Desweiteren ist dort wiedergegeben, dass die Schweißnaht experimentell nicht überprüft wurde und es während der Montagearbeit und im Betrieb zu einer unkontrollierten Verbreitung von Rissen im Schweißgut kommen kann. Ebenfalls wird beanstandet, dass die Schweißnaht des Lamellenstoßes nicht standardisiert ist und durch übliche zerstörungsfreie Prüfungen ein Riss in der Schweißnaht nicht diagnostiziert werden kann. Ein möglicher Anriss sei nicht reparierfähig.

Auf Grundlage der hier gewonnenen Ergebnisse können einige der aufgeführten Argumente nach dem heutigen Stand entkräftet werden.

Der Verfasser hält die technologische Ausführung der Schweißnaht des Lamellenstoßes nicht für aufwendig, da vom Prinzip das Schweißen des Lamellenstoßes mit den gleichen schweißtechnischen Herausforderungen verbunden ist wie das Schweißen eines dementsprechenden Stumpfstoßes. Diese Aussage wird durch die vorliegende Verfahrensprüfung gestützt. Die Ergebnisse zeigen, dass diese schweißtechnischen Anforderungen mit dem Stupfstoß vergleichbar sind. Die hier getätigten Untersuchungen bestätigen, dass an der Wurzel der Stirnfugennaht eine Kerbwirkung vorhanden ist. Ebenso scheint es sich zu bestätigen, dass durch die Geometrie und die Dickenverhältnisse an dieser Stelle eine Rissindizierung unvermeidbar ist. Die schweißtechnische Ausführung der Stirnfugennaht kann mit dem Schweißen einer Halsnaht verglichen werden. Auch hier ist der Wurzelpunkt nach dem Schweißen nicht mehr inspizierbar und weist mit großer Wahrscheinlichkeit eine ähnliche Rissindizierung auf; allerdings wird diese nicht quer zur Belastungsrichtung eingesetzt. Werden bei der Ausführung des Lamellenstoßes die Ausführungshinweise der RIL 804 [25] beachtet kann die Ermüdungsfestigkeit durch das zugehörige Kerbdetail auf Ermüdung bemessen werden. Desweiteren sei an dieser Stelle erwähnt, dass bisher kein Schadensfall an einem Bauwerk in Zusammenhang mit einem Lamellenstoß bekannt ist. Zur Unterstützung dieses Argumentes sei erwähnt, dass der Lamellenstoß sehr häufig in Eisenbahnbrücken, welche in der Regel einer hohen Ermüdungsbelastung ausgesetzt sind zur Anwendung kommt. Bisher wurde der Lamellenstoß auf Grundlage der Versuchsergebnisse aus dem LBF Bericht 3205 [27] auf Ermüdung bemessen. Das Nennspannungskonzept beruht auf der Tatsache, dass im Kerbdetail die Spannungsschwingbreite auf Grund des Kerbeinflusses heruntergesetzt wird und somit an dieser Stelle kein Versagen durch Ermüdung auftreten kann.

Es entspricht der Tatsache, dass durch herkömmliche Ultraschalltechnik der kritische Wurzelpunkt nicht untersucht werden kann. Allerdings möchte der Verfasser an dieser Stelle drauf hinweisen, dass in der Schweißtechnik bereits neue Ultraschalltechniken (Phased-Array) erprobt und im Pipelinebau bereits eingesetzt werden. Diese Technik ermöglicht evtl. die Inspektion der Wurzel der Stirnfugennaht. Dies müsste durch Versuche an Versuchskörpern mit einer definierten Risslänge erprobt werden um zu zeigen, dass diese Technik zu einem brauchbaren Ergebnis führt. Der Verfasser schlägt an dieser Stelle vor, eine Risslänge durch die Methoden der Bruchmechanik festzulegen, bei der die Ultraschalltechnik eine Unregelmäßigkeit anzeigen müsste.

Während der Erstellung dieser Arbeit und der Recherche hierzu, bildete sich der Verfasser folgende eigene Meinung zum Einsatz des Lamellenstoßes im Brückenbau:

Als erste Brücke wurde in dieser Arbeit die Bogenbrücke Galluspark betrachtet bei der Ober- und Untergurt des Versteifungsträgers durch Lamellen verstärkt wurde. Da bei einer Bemessung nach DIN EN 1993-1-9 diese Ausführungsvariante nicht ohne Blechsondergüte und Zulassungen im Einzelfall möglich wäre, möchte der Verfasser an dieser Stelle die Konsequenzen aufzeigen, die bei einer Ausführung der Brücke ohne Lamellenstoß folgen würden. Bei dieser Betrachtung wird der Versteifungsträger vom statische System isolierte und als einzelnes Teil betrachtet. Eine mögliche Variante wäre z.B. die Bauteilhöhe des Versteifungsträgers zu ändern und somit den Ober- und Untergurt weiter vom Schwerpunkt weg zuziehen, dadurch würden allerdings auch die Stege erhöhen und somit die Beulgefährdung ansteigen. Ein weiterer Aspekt ist, dass der Gestaltungsspielraum oder auch das Lichtraumprofil unterhalb der Brücke stark eingeschränkt werden würde. Um dieser Einschränkung entgegen zu wirken besteht die Möglichkeit durch Erhöhung der Pfeiler und Widerlager, welches höhere Rampen nach sich ziehen würde, das Lichtraumprofil zu korrigieren.

Betrachtet man den Verbundbrückenbau, in dem seit vielen Jahren das Verstärken des Obergurtes durch Lamellen eine gängige Praxis darstellt. Eine große Anzahl der Verbundbrücken mit Spannweiten über 50m wurde in den letzten Jahren im Taktschiebverfahren hergestellt (siehe [50]). Bei der Montage durch das Taktschiebverfahren ist es von großem Vorteil wenn die Bauhöhe des Überbaues gleichbleibend ist, da dies eine Taktschiebmontage ohne weitere Maßnahmen ermöglicht. Daraus folgend ergibt sich, um eine wirtschaftliche Konstruktion anbieten zu können, eine Abstufung der Ober- und Untergurte. Eine Veränderung der Breite der Obergurte würde zu einem Kostenanstieg beim Betoniervorgang der Fahrbahnplatte führen, da die Schalung unterschiedlich ausgebildet werden müsste und kein einheitlicher Schalwagen zum Einsatz kommen könnte. Bei einer Änderung der Obergurtbreite entzieht sich auf Grund der mittragenden Breite ab einem bestimmten Verhältnis das Material der Tragwirkung.

Aus diesen hier genannten Gesichtspunkten ist der Stahlbau vermutlich auch in den nächsten Jahren auf den Lamellenstoß angewiesen. Die hier wiedergegebene Betrachtung erhebt nicht den Anspruch auf Vollständigkeit und könne mit Sicherheit noch weiter ausgedehnt werden. Bei der Deutschen Bundesbahn entspricht die Ausführung des Lamellenstoßes seit den 70er Jahren dem Regelwerk. Im Zuge der Erweiterung der DS 804 wurden zum Lamellenstoß zwei Forschungsprojekte durchgeführt, nach denen auch in den nachfolgenden Regelwerken der Lamellenstoß eingeordnet wurde. Die Bemessungskonzepte zur Berechnung von zyklisch belasteten Bauteilen sehen vor, die Spannung im jedem Kerbdetail so zu verringern, dass selbst bei einer gewissen Vorschädigung im Bauteil kein Risswachstum während seiner Lebensdauer *stattfindet*.

Dies entspricht der Vorgehensweise bei der Bemessung eines Lamellenstoßes, da bekannt ist, dass durch dieses Schweißdetail das Widerstandsverhalten des Werkstoffes geschwächt wird. Deshalb wird die zulässige Spannung im Kerbdetail so weit herabgesetzt, dass unter Ermüdungsbelastung kein Risswachstum in der vorgegebenen Lebensdauer an der kritischen Stelle stattfindet. Dem Verfasser sind bis zum heutigen Zeitpunkt keine Schäden auf Ermüdung an einen Lamellenstoß bekannt. Dem Verfasser sieht keine fachlichen Gründe bekannt, die gegen die Ausführung dieses hier untersuchten Schweißdetails sprechen.

Literaturverzeichnis

- [1]. **DIN EN 1993-1-9/NA.** *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-9/ Deutscher Nationaler Anhang.* Deutsche Fassung DIN EN 1993-1-9/NA, August 2007.
- [2]. **DIN EN 1993-2/NA -Entwurf-.** *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 2: Stahlbrücken/ Deutscher Nationaler Anhang.* September 2009.
- [3]. **DIN EN 1993-1-9.** *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-9: Ermüdung.* Deutsche Fassung EN DIN 1993-1-9, Juli 2005.
- [4]. **T.Seeger.** *Stahlbau Handbuch 1 Teil B.* Köln : Stahlbau-Verlagsgesellschaft mbH, 1996.
- [5]. *Strukturmechanische Grundlagen der Ermüdung metallischer Werkstoffe.*
Macherauch, E und Mayr, P. VDI Berichte 268, Düsseldorf : VDI Verlag, 1976.
- [6]. **Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V.**
Schulungsunterlagen, Internationaler Schweißfachingenieurlehrgang. 2008.
- [7]. **Nussbaumer, A und Günther, H.-P.** Grundlagen und Erläuterung der neuen Ermüdungsnachweise nach Eurocode 3. [Buchverf.] Ulrike Kuhlmann.
Stahlbaukalender 2006. Berlin : Ernst und Sohn, 2006.
- [8]. **Radaj, Dieter.** *Eigenspannungen und Verzug beim Schweißen.* Düsseldorf : DVS Verlag, 2002.
- [9]. **Hobbacher, Adolf.** *Empfehlung zur Schwingfestigkeit geschweißter Verbindungen und Bauteile.* Düsseldorf : DVS Verlag, 1997.
- [10]. **Radaj, Dieter.** *Gestaltung und Berechnung von Schweißkonstruktionen.* Düsseldorf : DVS Verlag, 1985.
- [11]. **Haibach, Erwin.** *Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile.* Frankfurt am Main : VDMA Verlag, 2002. 3-8163-0424-9.
- [12]. **Hobbacher, Adolf.** *Zur Betriebsfestigkeit der Schweißkonstruktionen aus Baustahl auf Grundlage der Bruchmechanik.* 1975.
- [13]. **Radaj, Dieter.** *Ermüdungsfestigkeit Grundlagen für Leichtbau, Maschinen- und Stahlbau.* Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong, Barcelona, Budapest : Springer-Verlag, 1995.

-
- [14]. **Zerbst, Uwe und Hübner, Peter.** *DVS Merkblatt 2401, Bruchmechanische Bewertung von Fehlern in Schweißverbindungen.* Düsseldorf : DVS Verlag, 2004.
- [15]. **Kranz, Bernd.** *Dissertation zum Thema "Einfluss der Nahtvorbereitung an der Nahtwurzel auf die Ermüdungsfestigkeit nicht durchgeschweißter Stumpfstoßverbindungen aus Baustahl". Schriftenreihe Fügetechnik Magdeburg.* Aachen : Shaker Verlag, 2009.
- [16]. **Wöhler, August.** *Über die Versuche zur Ermittlung der Festigkeit von Achsen, welche in den Werkstätten der Niederschlesisch-Märkischen Eisenbahnen zu Frankfurt a.d.O. angestellt sind.* Z.f. Bauwesen 13. 1863.
- [17]. **Hobbacher, Adolf.** *Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components.* Paris : International Institute of Welding, 1996. IIW document IIW-XIII-1539-96/XV-845-96.
- [18]. **Olivier, R. und Ritter, W.** *Wöhlerlinienkatalog für Schweißverbindungen aus Baustählen.* Düsseldorf : DVS Verlag, 1979. Bd. Teil 1.
- [19]. **Sonsino, C.M. und Kranz, Bernd.** *IIW-Doc. No. XIII-2274-09/XV-1312-09.* 2009.
- [20]. **Hobbacher, Adolf.** *Zur Auswertung von Schwingfestigkeitsversuchen an Schweißverbindungen.* *Schweißen und Schneiden.* 4-1977, S. 143-146.
- [21]. **Stahel, Werner.** *Statistische Datenanalyse, Eine Einführung für Naturwissenschaftler.* s.l. : Vieweg, 2002.
- [22]. **Brozzetti, J., et al.** *Background Documentation Eurocode No.3, Background information on Fatigue design rules, Statistical Evaluation.* 1989.
- [23]. **DIN EN 1993-1-10.** *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-10, Stahlsortenauswahl im Hinblick auf Bruchzähigkeit.* Deutsche Fassung EN 1993-1-10: 2005.
- [24]. **DAST Richtlinie 009.** *Stahlsortenauswahl für geschweißte Stahlbauten.* 2005.
- [25]. **RIL 804 DB Net AG.** *Richtlinie 804; Eisenbahnbrücken planen, bauen und instandhalten.* 2003.
- [26]. **DS 804.** *Vorschrift für Eisenbahnbrücken und sonstige Ingenieurbauwerke.* DB Netz. 2000.
- [27]. **Olivier, R. und Ritter, W.** *Schwingfestigkeitsversuche für den Stumpfstoß in übereinanderliegende Gurtplatten.* Darmstadt : Laboratorium für Betriebsfestigkeit, 1974. Forschungsbericht. unveröffentlicht.

- [28]. **Hoffmann, E. und Oliver, R.** Schwingfestigkeitsuntersuchungen an Stumpfnähten in übereinanderliegenden Gurtplatten. *Stahlbau*. September 1977, September, S. 263-266.
- [29]. *Erfahrungen der Deutschen Bahn AG mit den DIN-Fachberichten im Entwurf, Ausschreibung und Ausführung.* **Koch, Eckhart.** VSVI Seminar Rheinland-Pfalz : s.n.
- [30]. **DIN 4132.** *Kranbahnen; Stahltragwerke; Grundsätze für Berechnung, bauliche Durchbildung und Ausführung.* 1981-02.
- [31]. **DIN Fachbericht 103.** *Stahlbrücken.* 2009.
- [32]. **DIN EN 1993-2.** *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 2: Stahlbrücken.* Deutsche Fassung EN 1993-2:2006.
- [33]. **DIN EN 1990.** *Grundlagen der Tragwerksplanung.* Deutsche Fassung DIN EN 1990, Oktober 2002.
- [34]. **Stroetmann, Richard, Hendrych, Jörg und Schleicher, Wolfram.** St.-Lorenz-Brücke in Lübeck-Flacher Bogen mit besonderem Montageablauf. *Stahlbau*. 2009, August.
- [35]. **Schreiber, Oliver.** Ortsumgehung Prag: Talbrücke Lochkov. *Stahlbau*. 2009, Oktober.
- [36]. **DIN EN 571-1.** *Zerstörungsfreie Prüfung - Eindringprüfung - Teil 1: Allgemeine Grundlagen; Deutsche Fassung EN 571-1:1997.* 1997-03.
- [37]. **DIN EN 1712.** *Zerstörungsfrei Prüfung von Schweißverbindungen- Ultraschallprüfung von Schweißverbindungen-Zulässigkeitsgrenzen.* Deutsche Fassung 1998+A1:2002.
- [38]. **DIN EN 1713.** *Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen- Ultraschallprüfung-Charakterisierung von Anzeigen in Schweißnähten.* 1998+ A1:2002.
- [39]. **DIN EN 1714.** *Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen- Ultraschallprüfung von Schweißverbindungen.* 1997 A1:2002.
- [40]. **DIN EN ISO 5817.** *Schweißen - Schmelzschweißverbindungen an Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen (ohne Strahlschweißen) - Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten (ISO 5817:2003 + Cor. 1:2006).* 2007.
- [41]. **DIN EN 1290.** *Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen - Magnetpulverprüfung von Schweißverbindungen.* 1998.
- [42]. **Stahl-Eisen-Werkstoffblatt (SEW) 088.** *Schweißgeeignete Feinkornbaustähle, Richtlinie für die Verarbeitung, besonders für das Schmelzschweißen.* 1993.

-
- [43]. **Kötting, G.** *Skript Schweißtechnik, Praktikum Nr. 6 Abkühlzeit $t_{8/5}$ beim Schweißen von Baustahl.* s.l. : FH Münster, 2009.
- [44]. **Olivier, R. und Ritter, W.** *Schwingfestigkeitsuntersuchungen für den Stumpfstoß in drei übereinanderliegende Gurtplatten.* Darmstadt : Fraunhofer Institut für Betriebsfestigkeit, 1982. Forschungsbericht. unveröffentlicht.
- [45]. **Berger, P.** *Einzelergebnisse von Ermüdungsversuchen an gemeinsamen Stumpfstoßen zweier übereinanderliegender Bleche, Unveröffentlichter Prüfbericht 2/78, 83/78 und 74/79 des Prüflabors des VEB MLK-Forschungsinstitut Leipzig.*
- [46]. **Helms, Rolf, et al.** *BAM Forschungsbericht 164, Zur Schwingfestigkeit großer geschweißter Stahlträger.* 1989.
- [47]. **Feldmann, Markus und Tischkardt, Dirk.** *Gutachterliche Stellungnahme zur Kerbfalleinteilung und Prüfung von Lamellenstoßen.* Aachen : unveröffentliches Gutachten, 2008.
- [48]. **Sedlacek, Gerhard, et al.** *Leitfaden zum DIN Fachbericht 103.* Berlin : Ernst & Sohn, 2003.
- [49]. **Kudla, Konrad.** *Einordnung des Lamellenstoßes in die Kerbfalltabellen des EC 3 durch bekannte und neue. Vortrag auf der 53. Sitzung der FG Brückenbau am 18.11.2009.* Düsseldorf : s.n.
- [50]. **Höhne, Tom.** *Entwicklung eines Vorbauschnabels zum Taktschieben von Großbrücken.* Roßwein, Hochschule Mittweida, Fachbereich Maschinenbau/ Feinwerktechnik, Diplomarbeit : s.n., 2009.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Eurocode - Programm, Quelle: eigene Darstellung	1
Abb. 2	Teile der DIN EN 1993, Quelle: eigene Darstellung	2
Abb. 3	mögliche Belastungsverläufe; Quelle: [6]	6
Abb. 4	Definition der Spannungen und Einfluss von Zugeigenspannungen; Quelle: [7]	8
Abb. 5	Spannungsverlauf an einer Kehlnaht; Quelle: [10]	9
Abb. 6	gestörter Spannungsverlauf; Quelle eigene Darstellung	9
Abb. 7	Bild 7.1 aus der DIN EN 1993-1-9	10
Abb. 8	Darstellung der linearen Regressionsmethoden; Quelle: eigene Darstellung ..	13
Abb. 9	Lage der Regressionsgeraden; Quelle: eigene Darstellung	13
Abb. 10	Lage der Regressionsgeraden in Abhängigkeit der Versuchsspannungen; Quelle: eigenen Darstellung	14
Abb. 11	Ergebnisse Beispielrechnung; Quelle: eigene Darstellung	19
Abb. 12	Auszug aus der RIL 804 [25]	23
Abb. 13	Auszug aus den Kerbfalltabellen, DIN Fachbericht 103; Quelle: [31]	25
Abb. 14	Auszug E DIN EN 1993-2/NA; Quelle: [2]	25
Abb. 15	Vergleich DIN Fb. 103 /-E- DIN EN 1993-2/NA; Quelle: eigene Darstellung ..	26
Abb. 16	Stabbogenbrücke Frankfurt Galluspark, Quelle: Max Bögl	28
Abb. 17	Materialverteilung Bogenbrücke Frankfurt Galluspark, Quelle: eigene Darstellung	29
Abb. 18	Talbrücke Lochkov im Bauzustand, Quelle: Max Bögl	31
Abb. 19	Verbundquerschnitt der Talbrücke Lochkov, Quelle: Max Bögl	31
Abb. 20	Brückenansichten und Querschnitt, Quelle: Max Bögl	32
Abb. 21	Ausschnitt Materialverteilung Brücke Lochkov Pfeiler 5, Quelle: Max Bögl ...	33
Abb. 22	Spannungspunkte Brücke Lochkov, Schnitt Pfeiler 5; Quelle eigene Darstellung	34
Abb. 23	Aufbau Musterschweißung, Quelle: Max Bögl	36
Abb. 24	hydraulische Presse; Quelle: Max Bögl	37
Abb. 25	Freischnitt im Steg; Quelle: Max Bögl	37
Abb. 26	Ballast; Quelle: Max Bögl	37
Abb. 27	Einhausung; Quelle: Max Bögl	37
Abb. 28	Ultraschallprüfschema, Quelle: Max Bögl	38
Abb. 29	Musterstück; Quelle: eigene Darstellung	39
Abb. 30	Zuschnitt der Versuchskörper; Quelle: eigene Darstellung	40

Abb. 31	Bereiche der mikroskopischen Untersuchung; Quelle: eigene Darstellung ...	41
Abb. 32	Makroschliff Kleinversuchskörper; Quelle: eigene Darstellung	42
Abb. 33	Position der mikroskopischen Untersuchungen; Quelle: eigene Darstellung	42
Abb. 34	Mikroskopische Aufnahme; Quelle: eigene Darstellung	43
Abb. 35	Mikroskopische Aufnahme; Quelle: eigene Darstellung	43
Abb. 36	Kerbbereiche am Gesamtquerschnitt; Quelle: Max Bögl	44
Abb. 37	Rissuntersuchung Großversuchskörper, MT Prüfung; Quelle: eigene Darstellung	45
Abb. 38	Abkühlkurven 1.Lage; Quelle: eigene Darstellung	49
Abb. 39	Abkühlkurven 2.Lage; Quelle: eigene Darstellung	49
Abb. 40	Abkühlkurven 3.Lage; Quelle: eigene Darstellung	50
Abb. 41	ZTU-Diagramm; Quelle: [43]	50
Abb. 42	Probenentnahme; Quelle: eigene Darstellung	51
Abb. 43	Probe 2 & 5; Quelle: eigene Darstellung	52
Abb. 44	Probe 8; Quelle: eigene Darstellung	53
Abb. 45	Großversuchskörper; Quelle: eigene Darstellung	54
Abb. 46	Flachprobeneinspannung Großversuche; Quelle: Labor für Stahl- und Leichtbau	55
Abb. 47	G.Pk2, Rissfortschritt und Vergrößerung des Anrissbereiches; Quelle: Labor für Stahl- und Leichtbau	58
Abb. 48	G.Pk6, schlagartiges Versagen; Quelle: Labor für Stahl- und Leichtbau	59
Abb. 49	G.Pk6, Bruchflächen; Quelle: Labor für Stahl- und Leichtbau	59
Abb. 50	Entnahmeschema Bruchflächen; Quelle: eigene Darstellung	60
Abb. 51	G.Pk 8, Probe B; Quelle: eigene Darstellung	60
Abb. 52	G.Pk 9, Probe A; Quelle: eigene Darstellung	61
Abb. 53	Wöhlerkurve Großversuche, $\Delta s = 0,05$, $m=3$; Quelle: eigene Darstellung	62
Abb. 54	Wöhlerkurve Großversuche, $\Delta s = 0,05$, $m=3,26$; Quelle: eigene Darstellung	63
Abb. 55	Wöhlerkurve Großversuche, Versuchsabbruch, $m=3$; Quelle: eigene Darstellung	64
Abb. 56	Wöhlerkurve Großversuche, Versuchsabbruch, $m=3,48$; Quelle: eigene Darstellung	65
Abb. 57	Hauseigene Hydropulsanlage der Firmengruppe Max Bögl; Quelle: eigene Darstellung	66
Abb. 58	Abmessungen Kleinversuchskörper; Quelle: eigene Darstellung	67
Abb. 59	Versuchsaufbau A-1, Kleinversuche; Quelle: Max Bögl	68

Abb. 60	Probekörper 3, Ermüdungsbruch bei $N = 1233077$ Lastwechseln; Quelle: Max Bögl	69
Abb. 61	Bruchbilder Probe 3, B und A; Quelle: eigene Darstellung	69
Abb. 62	Erklärung Pumpeffekt; Quelle: eigene Darstellung	70
Abb. 63	Effekt a und b; Quelle: eigene Darstellung	71
Abb. 64	Versuchsaufbau A-2, Kleinversuche; Quelle: eigene Darstellung	71
Abb. 65	Ermüdungsbruch Probekörper 1: Quelle: Max Bögl.....	72
Abb. 66	Versuchsaufbau B; Quelle: eigene Darstellung	73
Abb. 67	Versuchskörper B; Quelle: eigene Darstellung	73
Abb. 68	Rissfortschritt, K.Pk 5.....	74
Abb. 69	Probekörper, K.Pk5 nach dem Versuch: Quelle: eigene Darstellung	75
Abb. 70	Bruchflächen, K.Pk5; Quelle: eigene Darstellung	75
Abb. 71	Prüfkörperform; Quelle: [27].....	77
Abb. 72	Ergebnisse $R=1$, $m=2,49$; Quelle: [27].....	79
Abb. 73	Ergebnisse $R=1$, $m=3$; Quelle: [27].....	80
Abb. 74	Ergebnisse $R=0$, $m=3$; Quelle: [27].....	82
Abb. 75	Ergebnisse Schwingversuche, St 37-2, 2x10mm, $R=+0,1$, $m=1,35$; Quelle: LBF 4879 [44]	85
Abb. 76	Ergebnisse Schwingversuche, St 37-2, 2x10mm, $R=+0,1$, $m=3$; Quelle: LBF 4879 [44]	86
Abb. 77	Ergebnisse Schwingversuche, St 52-3, 2x10mm, $R=+0,1$, $m=3,75$; Quelle: LBF 4879 [44]	88
Abb. 78	Ergebnisse Schwingversuche, St 52-3, 2x10mm, $R=+0,1$, $m=3$; Quelle: LBF 4879 [44]	89
Abb. 79	Ergebnisse Schwingversuche, St 52-2, 2x25mm, $R=+0,1$, $m=2,85$; Quelle: LBF 4879 [44]	91
Abb. 80	Ergebnisse Schwingversuche, St 52-2, 2x25mm, $R=+0,1$, $m=3$; Quelle: LBF 4879 [44]	92
Abb. 81	Ergebnisse Schwingversuche, KT 52-2, 2x25mm, $R=+0,1$, $m=4,19$; Quelle: LBF 4879 [44]	94
Abb. 82	Ergebnisse Schwingversuche, KT 52-2, 2x25mm, $R=+0,1$, $m=3$; Quelle: LBF 4879 [44]	95
Abb. 83	Ergebnisse Schwingversuche, St 37-2, 2x25mm, $R=+0,1$, $m=3,55$; Quelle: LBF 4879 [44]	97
Abb. 84	Ergebnisse Schwingversuche, St 37-2, 2x25mm, $R=+0,1$, $m=3$; Quelle: LBF 4879 [44]	98
Abb. 85	Versuchskörper 3x50mm; Quelle: LBF Bericht 4879 [44]	100

Abb. 86	Versuchskörper 30mm+40mm+30mm; Quelle: LBF Bericht 4879 [44]	100
Abb. 87	Ergebnisse Schwingversuche, St 37-2, 3x50mm, $R=-1$, $m=4,57$; Quelle: LBF 4879 [44]	102
Abb. 88	Ergebnisse Schwingversuche, St 37-2, 3x50mm, $R=-1$, $m=3$; Quelle: LBF 4879 [44]	103
Abb. 89	Ergebnisse Schwingversuche, St 37-2, 3x50mm, $R=0$, $m=4,85$; Quelle: LBF 4879 [23]	105
Abb. 90	Ergebnisse Schwingversuche, St 37-2, 3x50mm, $R=0$, $m=0$; Quelle: LBF 4879 [44]	106
Abb. 91	Ergebnisse Schwingversuche, St 37-2, 30mm+40mm+30mm, $R=-1$, $M=3$; Quelle: LBF 4879 [44]	108
Abb. 92	Ergebnisse Schwingversuche, St 37-2, 30mm+40mm+30mm, $R=-1$, $m=3,61$; Quelle: LBF 4879 [44]	109
Abb. 93	Ergebnisse Schwingversuche, St 37-2, 30mm+40mm+30mm, $R=-1$, $m=3$; Quelle: LBF 4879 [44]	110
Abb. 94	Ergebnisse Schwingversuche, St 37-2, 30mm+40mm+30mm, $R=-1$, $m=3,61$; Quelle: LBF 4879 [44]	111
Abb. 95	Schweißnahtdetails, Schwingversuche BAM 164 [46]	112
Abb. 96	Ergebnisse Schwingversuche, St 37-2, 35mm+25mm, $R=-1$, $m=1,45$; Quelle: BAM 164 [46]	114
Abb. 97	Ergebnisse Schwingversuche, St 37-2, 35mm+25mm, $R=-1$, $m=3$; Quelle: BAM 164 [46]	115
Abb. 98	Spannungserhöhung aus lokalen Kerbspannungen im Lamellenstoß; Quelle: eigene Darstellung	119
Abb. 99	Darstellung abgeleiteten Trend für den Maßstabseffekt aus den Ergebnissen LBF 3205 und den Ergebnissen dieser Arbeit; Quelle: eigenen Darstellung	120
Abb. 100	Forschungsbedarf am Lamellenstoß; Quelle: [49]	121

Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Datenpool; Quelle: [22].....	16
Tab. 2	Dickenbegrenzung von Stahlteilen für Straßenbrücken; Quelle: E DIN EN 1993-2/NA:2009-09	21
Tab. 3	Spannungen im Versteifungsträger; Quelle: eigenen Darstellung	30
Tab. 4	Spannungen in den einzelnen Spannungspunkten; Quelle: eigene Darstellung	34
Tab. 5	Spannungen im Lamellenstoß am Anschnitt; Quelle: eigenen Darstellung	34
Tab. 6	Abmaße der Musterstücke; Quelle: Max Bögl.....	39
Tab. 7	Ergebnisse mikroskopischer Betrachtung an Kleinversuchskörpern; Quelle: eigenen Darstellung.....	42
Tab. 8	Ergebnisse Untersuchungen Großversuchskörper; Quelle: eigene Darstellung	45
Tab. 9	Auswertung der Abkühlzeiten; Quelle: eigenen Darstellung	48
Tab. 10	HV 30 Werte; Quelle: K.Kudla	51
Tab. 11	gemessene Härtewerte WEZ; Quelle: Labor für Stahl- und Leichtbau	52
Tab. 12	Ergebnisse makroskopischen Betrachtung; Quelle: eigenen Darstellung	53
Tab. 13	Ergebnisse Großversuche, $\Delta s = 0,05\text{mm}$; Quelle: Anlage C	56
Tab. 14	Ergebnisse Großversuche, Versuchsabbruch; Quelle: Anlage C	57
Tab. 15	Versuchsergebnisse Versuchsaufbau A-1; Quelle: eigene Darstellung	68
Tab. 16	Versuchsergebnisse Versuchsaufbau A-2; Quelle: eigene Darstellung	72
Tab. 17	Versuchsergebnisse, Versuchsaufbau B; Quelle: eigenen Darstellung.....	74
Tab. 18	Grundwerkstoff; Quelle: [27]	76
Tab. 19	Werkstoffkennwerte; Quelle: [27].....	76
Tab. 20	Schmelzanalyse; Quelle: [27]	77
Tab. 21	Versuchsergebnisse Schwingversuche $R=-1$; Quelle: LBF 3205 [27]	78
Tab. 22	Versuchsergebnisse Schwingversuche $R=0$; Quelle: LBF 3205 [27]	81
Tab. 23	Ergebnisse Schwingversuche, St 37-2, $2 \times 10\text{mm}$, $R=+0,1$; Quelle: LBF 4879 [44]	84
Tab. 24	Ergebnisse Schwingversuche, St 52-3, $2 \times 10\text{mm}$, $R=+0,1$; Quelle: LBF 4879 [44]	87
Tab. 25	Ergebnisse Schwingversuche, St 52-2, $2 \times 25\text{mm}$, $R=+0,1$; Quelle: LBF 4879 [44]	90
Tab. 26	Ergebnisse Schwingversuche, KT 52-2, $2 \times 25\text{mm}$, $R=+0,1$; Quelle: LBF 4879 [44]	93

Tab. 27	Ergebnisse Schwingversuche, St 37-2, 2x25mm, $R=+0,1$; Quelle: LBF 4879 [44]	96
Tab. 28	Werkstoffkennwerte; Quelle: [44].....	99
Tab. 29	Schmelzanalyse; Quelle: [44]	99
Tab. 30	Ergebnisse Schwingversuche, St 37-2, 3x50mm, $R=-1$; Quelle: LBF 4879 [44]	101
Tab. 31	Ergebnisse Schwingversuche, St 37-2, 3x50mm, $R=0$; Quelle: LBF 4879 [44]	104
Tab. 32	Ergebnisse Schwingversuche, St 37-2, 30mm+40mm+30mm , $R=-1$; Quelle: LBF 4879 [44]	107
Tab. 33	Ergebnisse Schwingversuche, St 37-2, 30mm+40mm+30mm , $R=0$; Quelle: LBF 4879 [44]	107
Tab. 34	Ergebnisse Schwingversuche, St 37-2, 35mm+25mm , $R=-1$; Quelle: BAM 164 [46]	113
Tab. 35	Wert Zugversuch; Quelle Werkstoffzeugnis	XVII
Tab. 36	Werte kerbschlagbiegeversuch; Quelle Werkstoffzeugnis	XVII
Tab. 37	Werte Chemische Schmelzanalyse; Quelle Werkstoffzeugnis	XVII
Tab. 38	Schweißanweisung Lamellenstoß Brücke Lochkov Fehler! Textmarke nicht definiert.	

Verwendete Hilfsmittel

- Autodesk, Autocad 2008
- Microsoft Office 2007
- Siemens PLM, NX06
- Tekla Structures 14.0

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbständig und nur unter der Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Bearbeitungsort, Datum

Unterschrift

Anhang A. Materialkennwerte

Tab. 35 Wert Zugversuch; Quelle Werkstoffzeugnis

Zugversuch		S355NL+Z25 Dicke: 100mm			
Probennummer	Prüftemperatur	REH [N/mm ²]	RM [N/mm ²]	A[%]	Z[%]
K4	RT	379	534	31,0	
K2	RT				70,4
K2	RT				70,8
K2	RT				70,5
K4	RT	366	528	30,0	

Tab. 36 Werte kerbschlagbiegeversuch; Quelle Werkstoffzeugnis

Kerbschlagbiegeversuch			S355NL+Z25 Dicke: 100mm			
Probennr.	Prüftemperatur [°C]	Probenform	Probe 1 [J]	Probe 1 [J]	Probe 1 [J]	Mittelwert [J]
K4	-50	CHP-V	130	126	128	128
K4	-50	CHP-V	92	97	123	104

Tab. 37 Werte Chemische Schmelzanalyse; Quelle Werkstoffzeugnis

Chemische Zusammensetzung % Schmelzanalyse													
C	Si	Mn	P	S	N	Cu	Mo	Ni	Cr	V	Nb	Ti	B
0,153	0,465	1,58	0,011	0,0014	0,0048	0,023	0,008	0,034	0,023	0,001	0,033	0,005	0,0001

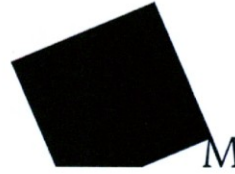
Anhang B. Schweißanweisung Lamellenstoß

**Der Inhalt des Anhanges B ist nicht für die Öffentlichkeit
freigegeben und wurde durch Max Bögl Stahl- und Anlagenbau
GmbH & Co. KG gesperrt.**

Anhang C.Prüfbericht Nr.: 2009 – 2050**Labor für Stahl- und Leichtmetallbau**Hochschule für angewandte Wissenschaften FH
München

Fakultät 02 Bauingenieurwesen / Stahlbau

Leitung: Prof. Dr. - Ing. Ö. Bucak

Hochschule München, Karlstraße 6, 80333 München
Tel.: 0049/ (0)89/ 1265- 2611; FAX 0049/ (0)89/ 1265- 2699; email: info@laborstl.de

Bay 27 / NB 1643

Prüfbericht Nr.: 2009 – 2050

Gegenstand: Schwingversuche an Prüfkörpern eines Lamellenstoßes
hinsichtlich der Ermüdungsfestigkeit der Stirnfugennaht

Auftraggeber: Max Bögl Neumarkt
Badstraße 15
D- 92318 Neumarkt

Dieser Prüfbericht enthält 7 Seiten.

Ausgabedatum: 21.12.2009

Projektnummer: 09-284

Dieser Prüfbericht darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Auszugweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung



Labor für Stahl- und Leichtmetallbau
HS München

Prüfbericht Nr.: 2009-2050
Seite 2

1. Allgemeines

Gegenstand dieses Prüfberichts sind versuchstechnische Untersuchungen an Probekörpern eines Lamellenstoßes hinsichtlich der Ermüdungsfestigkeit der Stirnfugennaht. Die Firma Max Bögl lieferte 13 Probekörper zur Ermittlung der Lastspielzahlen unter konstanten Lastamplituden (Wöhlerversuch). Nach Angaben der Firma Max Bögl wurden die Probekörper unter vergleichbaren Baustellenbedingungen gefertigt (Stirnfugennaht MAG Fülldraht, X- Naht UP- Verfahren).

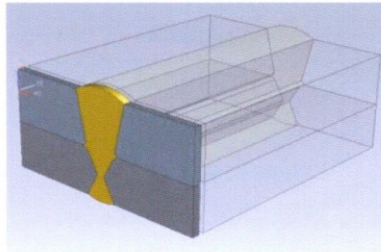


Abb. 1: schematische Darstellung Probekörper

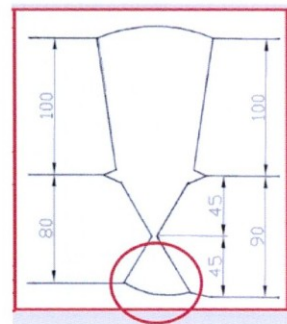


Abb. 2: Querschnitt

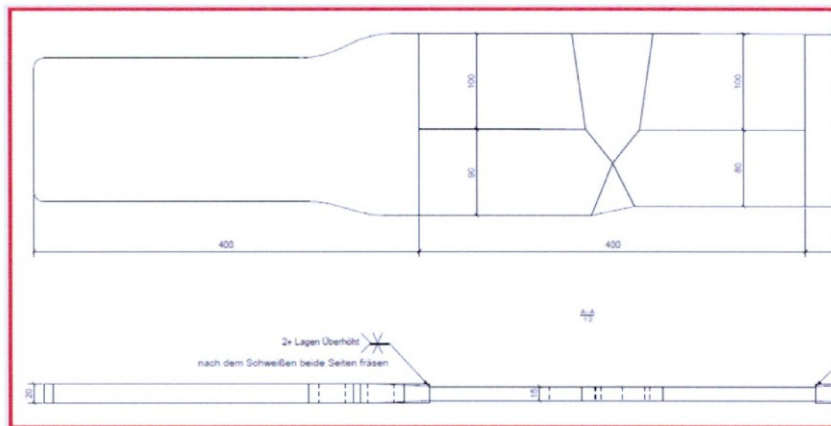


Abb. 3: Abmessungen Probekörper mit Lasteinleitung

Dieser Prüfbericht darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Auszugweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.



Labor für Stahl- und Leichtmetallbau
HS München

Prüfbericht Nr.: 2009-2050
Seite 3

Die Versuche wurden in den Räumlichkeiten des Labors für Stahl- und Leichtmetallbau auf einem Hochfrequenzpulsator der Marke Schenck durchgeführt.



Abb. 4: Versuchsaufbau

Die Versuche wurden zugschwellend bei einem Schwingbreitenverhältnis von $R = 0,1$ durchgeführt. Die nachfolgend beschriebene Spannungsschwingbreite (Nennspannung) wird an der maßgebenden Querschnittsfläche ermittelt, d.h. nach Abb. 3 $A = 180 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} = 2700 \text{ mm}^2$

3. Ergebnisse

Die nachfolgende Tabelle gibt die Spannungsschwingbreite ($\Delta\sigma$) und die Lastwechselzahl beim ersten erkennbaren Anriss (Verformungszunahme $\Delta s = 0,05 \text{ mm}$) an. Die Versuche wurden kraftgesteuert geregelt (konstante Lastamplitude auch bei Steifigkeitsänderung, Anriss), somit kann über die messtechnisch erfasste Verformung ein Versagen definiert werden.

Dieser Prüfbericht darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Auszugweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.



Labor für Stahl- und Leichtmetallbau
HS München

Prüfbericht Nr.: 2009-2050
Seite 4

PK	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	LW	Ergebnis
Pk1	133	836.497	Keine Beschädigung Stirnfugennaht, Versagen im Bereich der Lasteinleitung
Pk2	133	496.077	Keine Beschädigung Stirnfugennaht, Versagen Schweißnahtfuß X- Naht
Pk3	100	6.000.000	Keine Beschädigung; Versuchabbruch
Pk3a	133	1.018.811	Keine Beschädigung Stirnfugennaht, Versagen Schweißnahtfuß X- Naht
PK4	150	377.412	Keine Beschädigung Stirnfugennaht, Versagen Schweißnahtfuß X- Naht
Pk5	150	546.343	Keine Beschädigung Stirnfugennaht, Versagen Schweißnahtfuß X- Naht
Pk6	100	890.148	Keine Beschädigung Stirnfugennaht, Versagen Schweißnahtfuß X- Naht
Pk7	180	143.986	Keine Beschädigung Stirnfugennaht, Versagen Schweißnahtfuß X- Naht
Pk8	180	220.711	Keine Beschädigung Stirnfugennaht, Versagen Schweißnahtfuß X- Naht
Pk9	120	203.275	Keine Beschädigung Stirnfugennaht, Versagen Schweißnahtfuß X- Naht
Pk10	120	607.877	Keine Beschädigung Stirnfugennaht, Versagen Schweißnahtfuß X- Naht
Pk11	120	543.835	Keine Beschädigung Stirnfugennaht, Versagen Schweißnahtfuß X- Naht
Pk12	100	2.183.501	Keine Beschädigung Stirnfugennaht, Versagen Schweißnahtfuß X- Naht
Pk13	165	255.036	Keine Beschädigung Stirnfugennaht, Versagen Schweißnahtfuß X- Naht

Tabelle 1: Ergebnisse Probekörper

Es konnte an keinem Probekörper eine Beschädigung an der Stirnfugennaht festgestellt werden. Vereinzelt war vor Beginn der Versuchsdurchführung ein Anriss an der Stirnfugennaht erkennbar (vgl. Bild 5). Dieser wurde im Versuchsverlauf weiter hinsichtlich Rissfortschritt beobachtet, es konnte keine Veränderung infolge der wechselnden Zugbeanspruchung festgestellt werden. Ein Großteil der Probekörper versagte am Schweißnahtfuß, Grundblech – X- Naht (z. B. Bild 6). Probekörper 1 versagte im Bereich der Lasteinleitung (vgl. Bild 7).

Dieser Prüfbericht darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Auszugweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.



Labor für Stahl- und Leichtmetallbau
HS München

Prüfbericht Nr.: 2009-2050
Seite 5

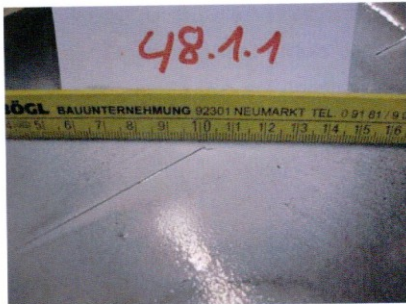


Abb. 5: Riss Stirnfugennaht vor Versuchsdurchführung

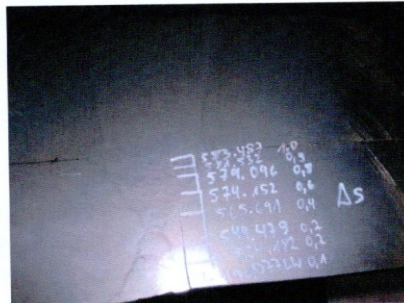


Abb. 6: Rissverlauf, Anriss X- Naht Schweißnahtfuß



Abb. 7: Rissbeginn Einspannung Pk1

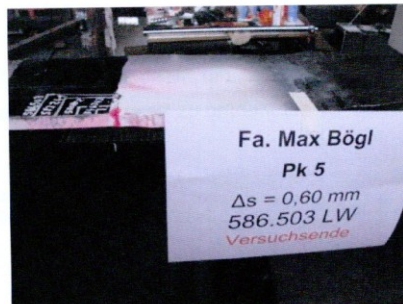


Abb. 8: Rissverlauf Pk5



Abb. 9: Durchriss Pk 3a



Abb. 10: Rissverlauf Pk9

Dieser Prüfbericht darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Auszugweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.



Labor für Stahl- und Leichtmetallbau
HS München

Prüfbericht Nr.: 2009-2050
Seite 6

Nachfolgend werden die Versuchsdaten statistisch ausgewertet. Der Mittelwert ($P_0 = 50\%$) der Ergebnisse wird mittels der orthogonalen Regression (Bild 11) ermittelt. Der Streubereich ergibt sich bei Annahme einer Aussagewahrscheinlichkeit von $P_a = 75\%$ und einer Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_0 = 95\%$.

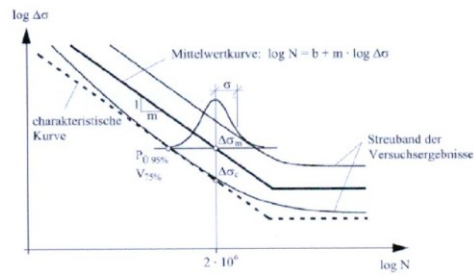
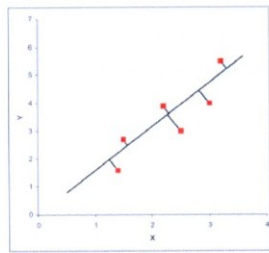


Abb. 11: orthogonale Regression Abb. 12: Streubereich

Wie oben bereits beschrieben, trat bei keinem Probekörper ein Versagen an der Stirnfugennaht auf. Der Tabelle 1 ist die einzelne Versagensart zu entnehmen.

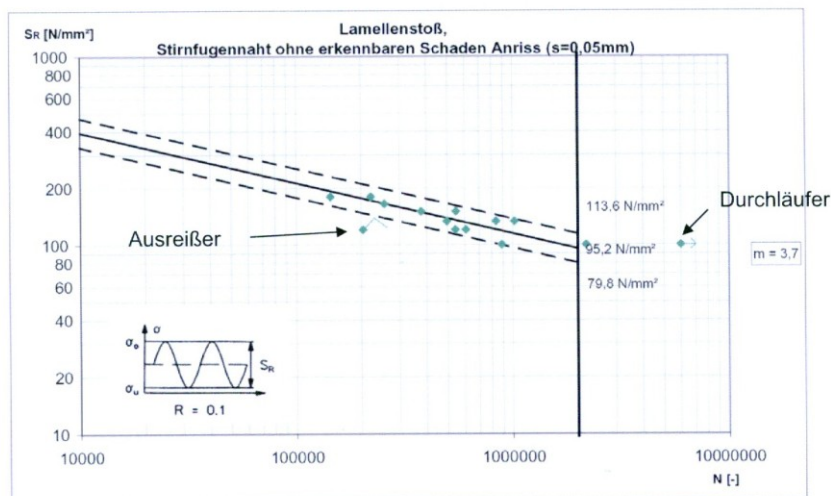


Abb. 13: Darstellung der Ergebnisse im Wöhlerdiagramm

Dieser Prüfbericht darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Auszugweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.



Labor für Stahl- und Leichtmetallbau
HS München

Prüfbericht Nr.: 2009-2050
Seite 7

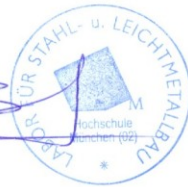
4. Zusammenfassung

Im Auftrag der Firma Max Bögl wurden vom Labor für Stahl- und Leichtmetallbau versuchstechnische Untersuchungen (Wöhlerversuche) an Probekörpern eines Lamellenstoßes hinsichtlich der Ermüdungsfestigkeit der Stirnfugennaht durchgeführt. Die Ergebnisse sind unter Punkt 3 ausführlich beschrieben. Bei keinem der 13 Probekörper konnte ein Versagen an der Stirnfugennaht festgestellt werden, die Ergebnisse sind der Tabelle 1 und Abb. 13 zu entnehmen.

Für die Leitung



Prof. Dr.-Ing. Ö. Bucak



Der Sachbearbeiter



J. Lorenz M. ENG.

Dieser Prüfbericht darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Auszugweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

Anhang D. LBF Bericht Nr. 3205, Schwingfestigkeitsversuche für den Stumpfstoß in übereinanderliegender Gurt- platten

Ansprechpartner bei der Deutschen Bahn AG für den Forschungsbericht ist:

Michael Albert

Vorstandsressort Technik

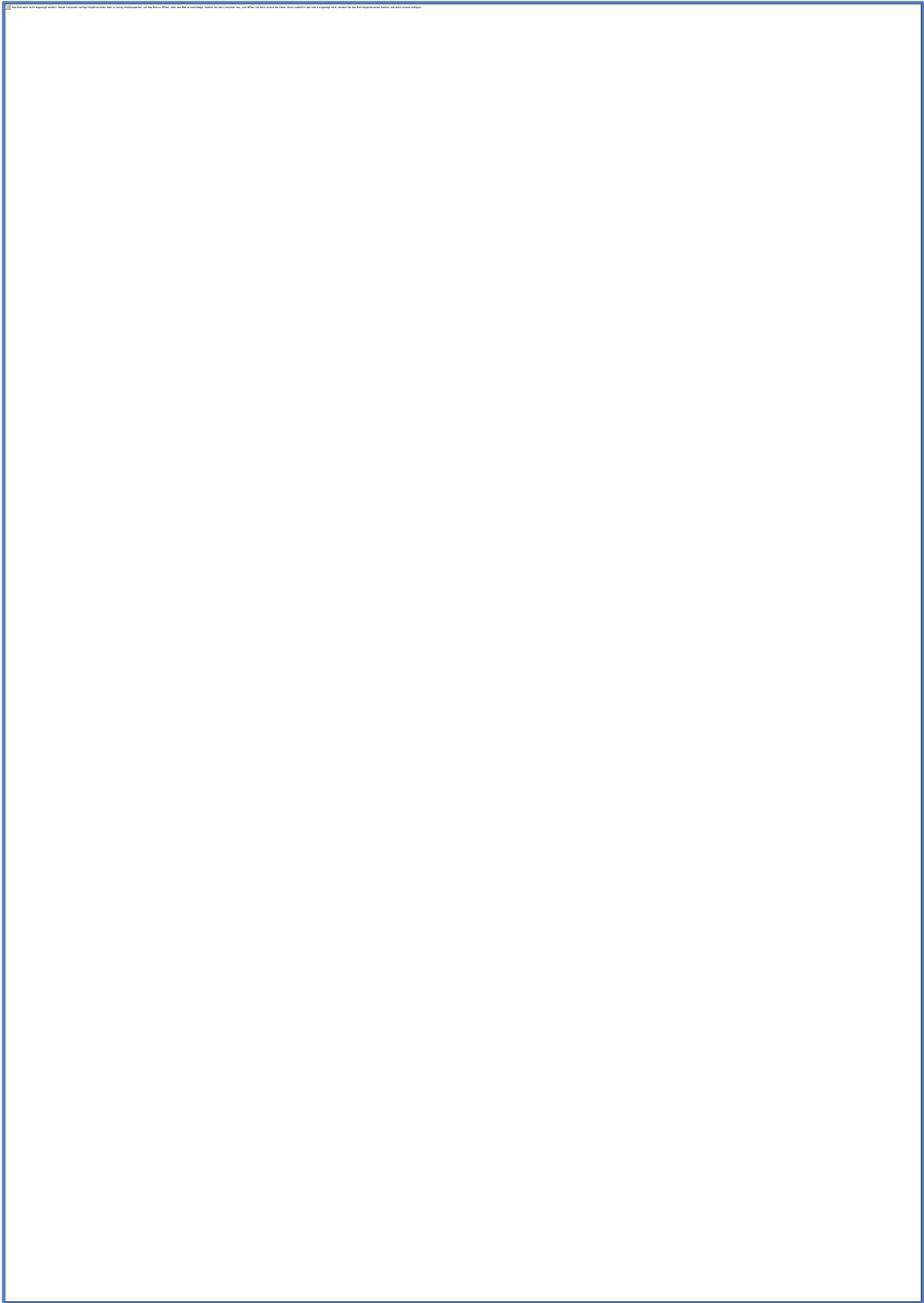
Systemverbund und Dienstleistungen

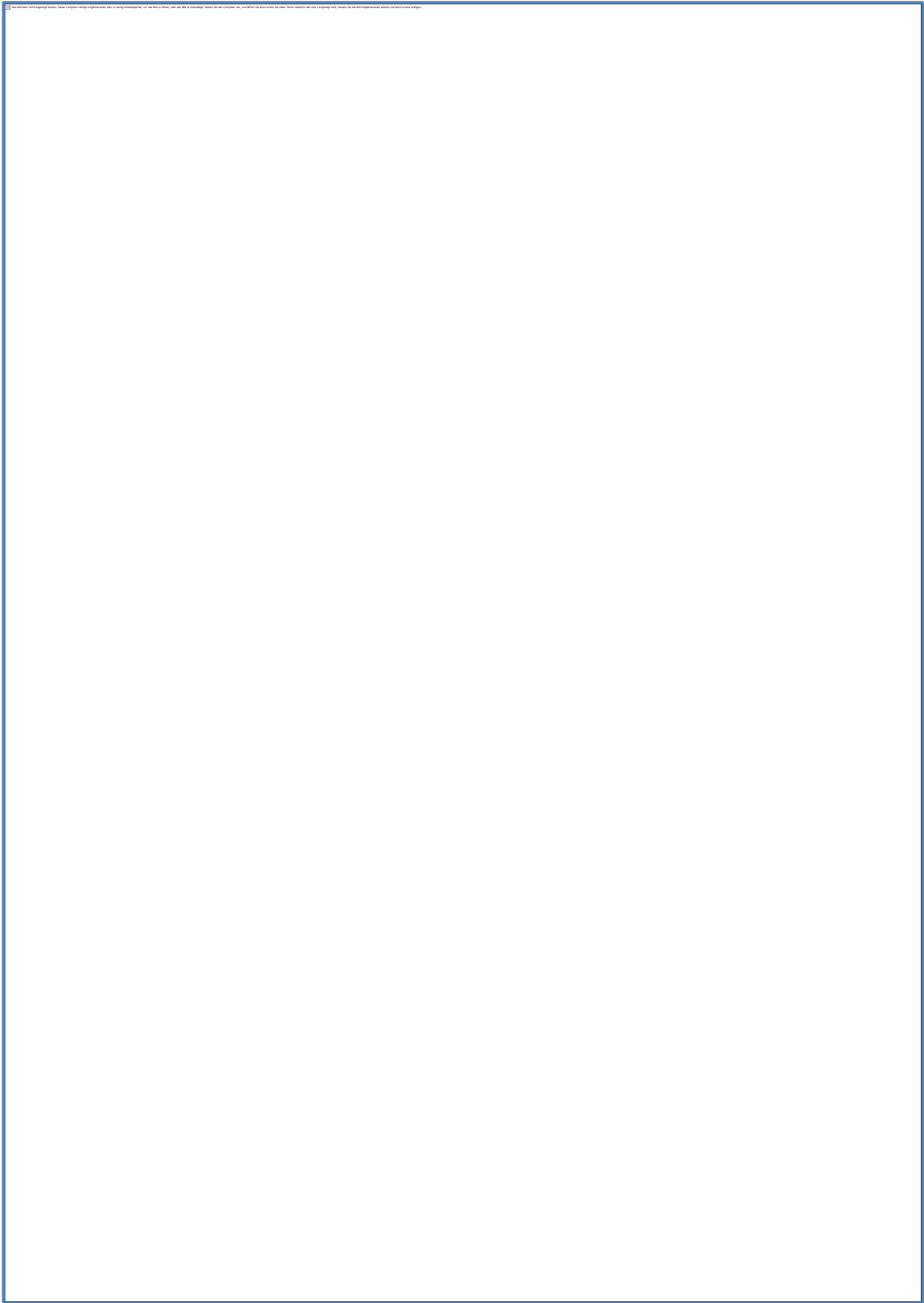
Technik Bauliche Anlagen (TEC 3)

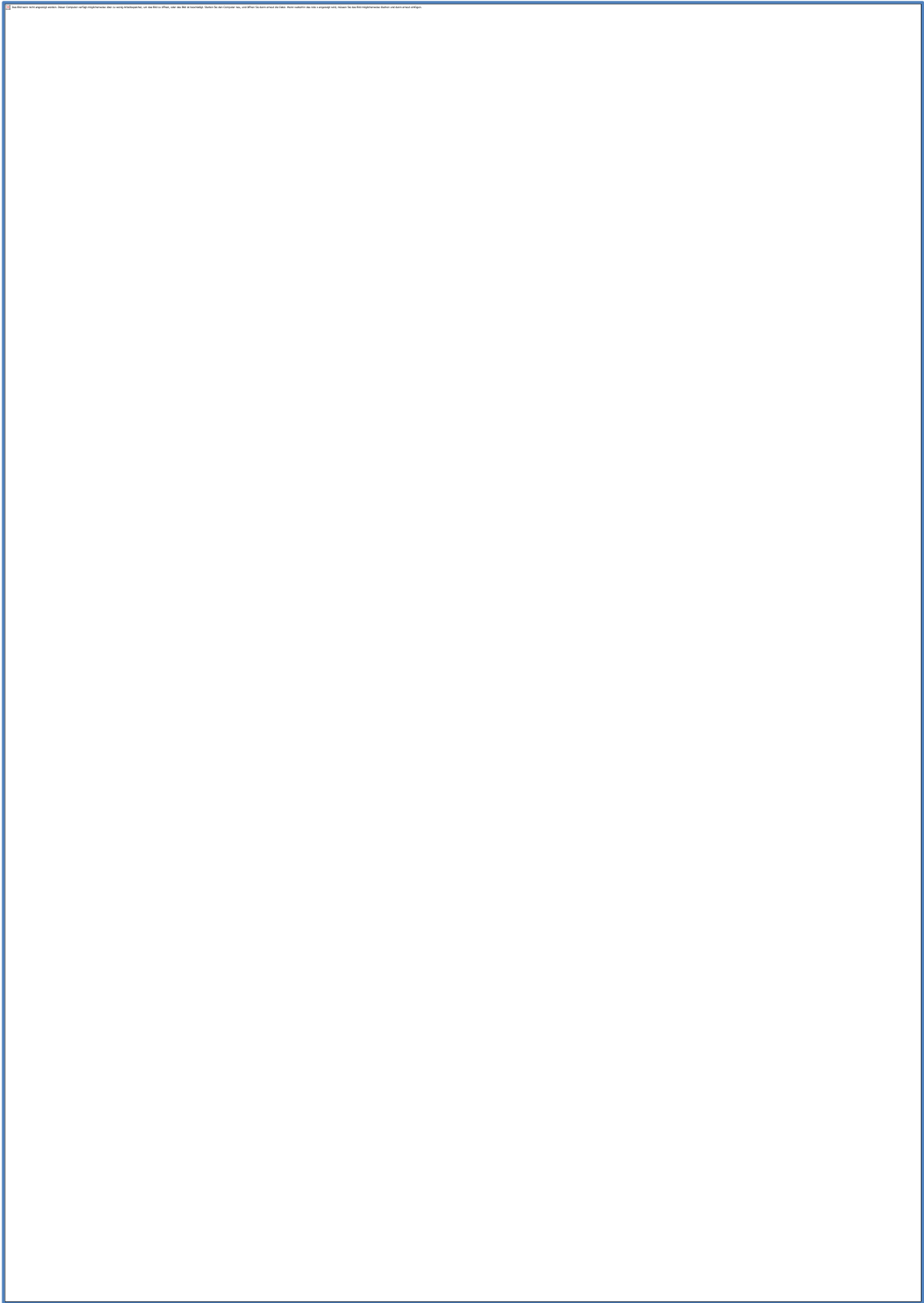
Deutsche Bahn AG Richelstraße 3, 80634 München

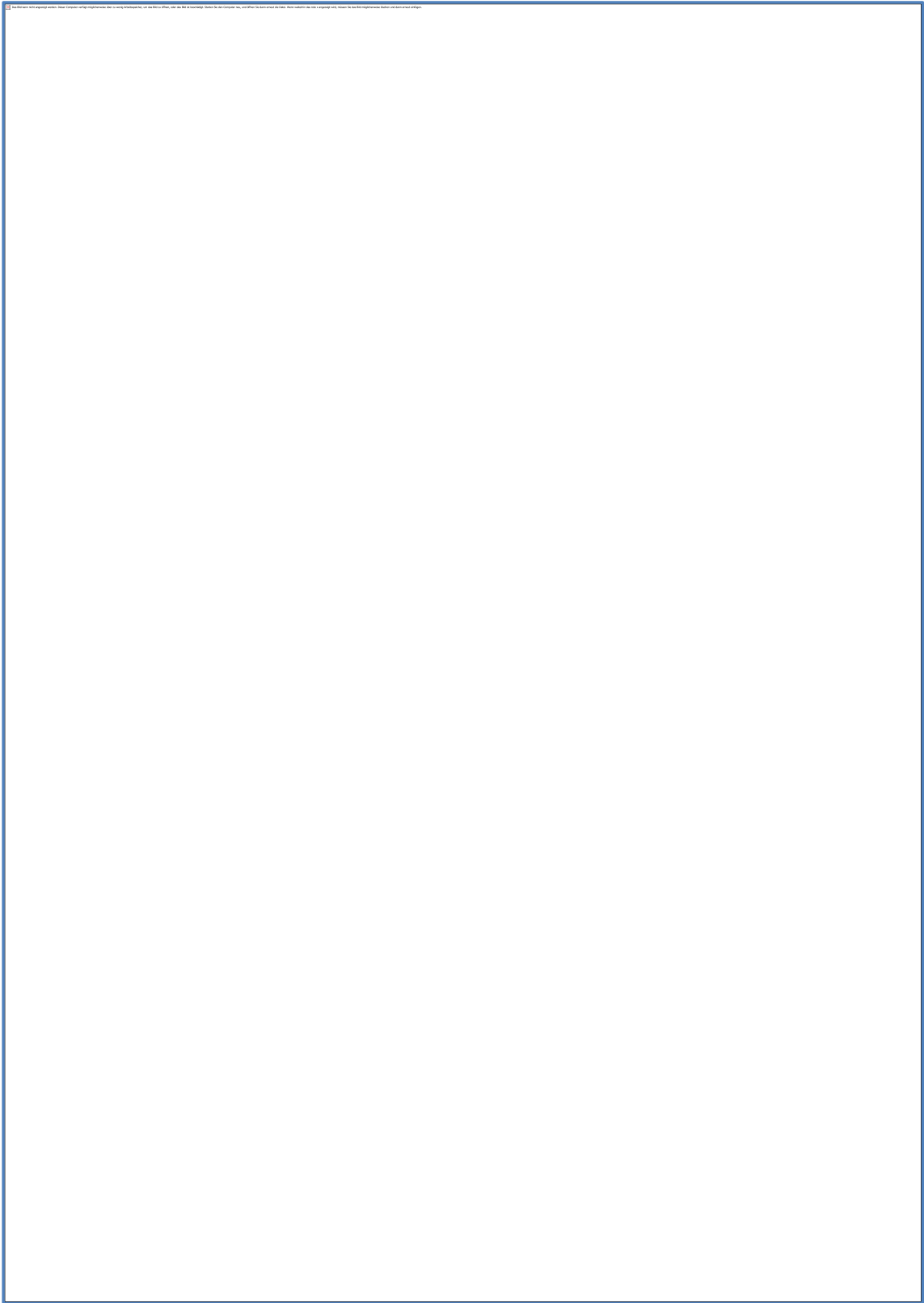
Tel. +49 (0)89 1308-5930, Fax -2405

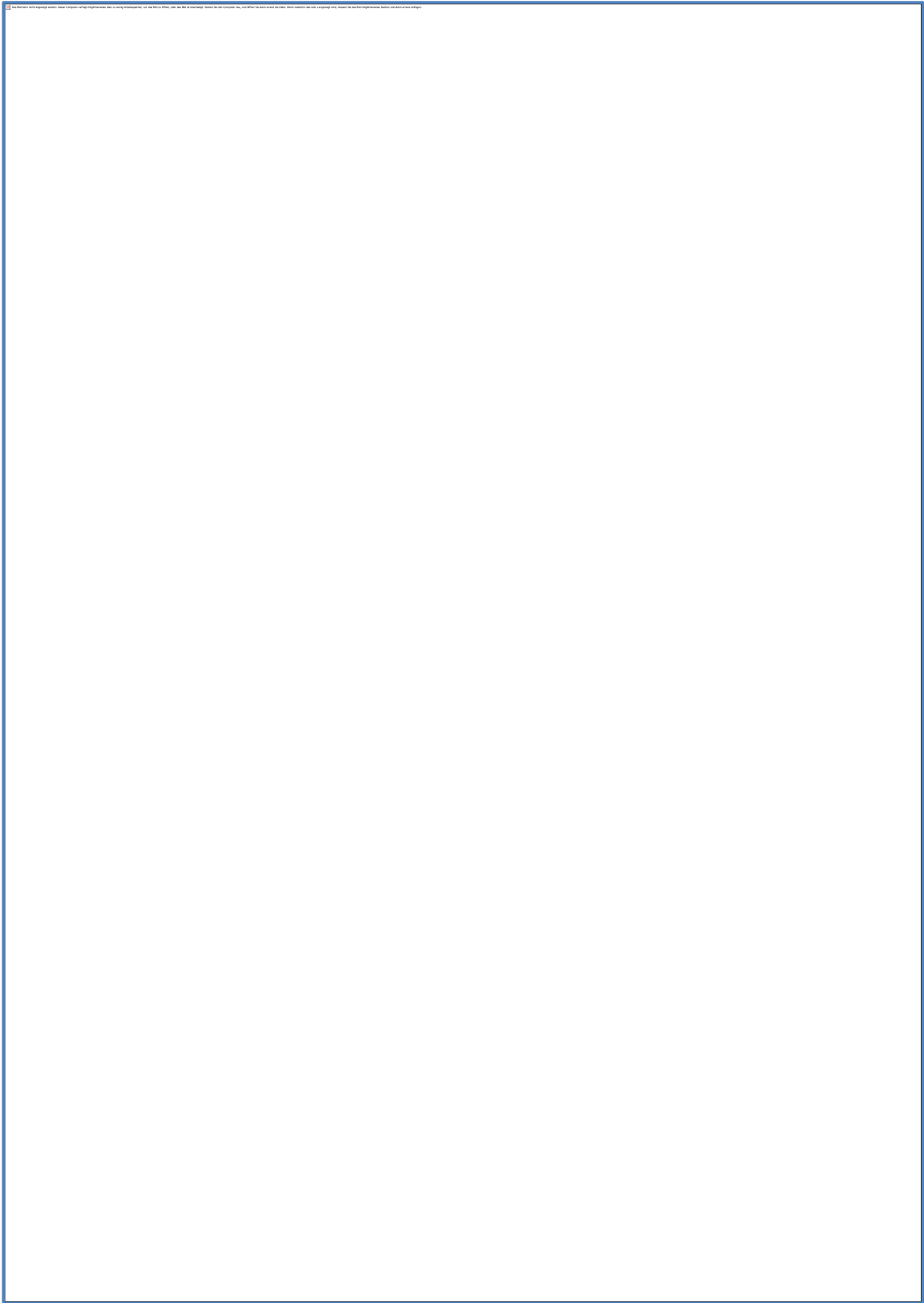
Michael.Albert@deutschebahn.com

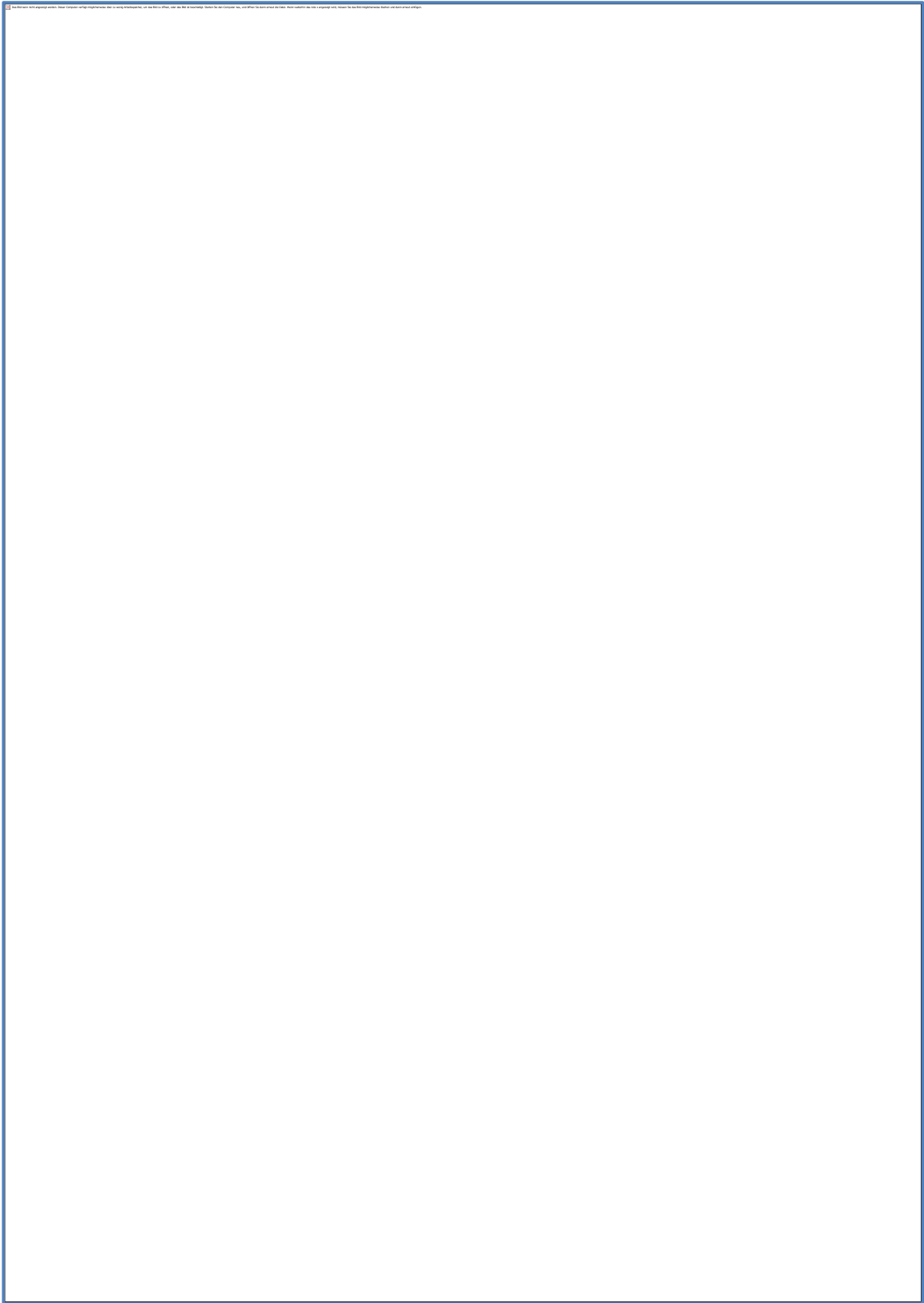


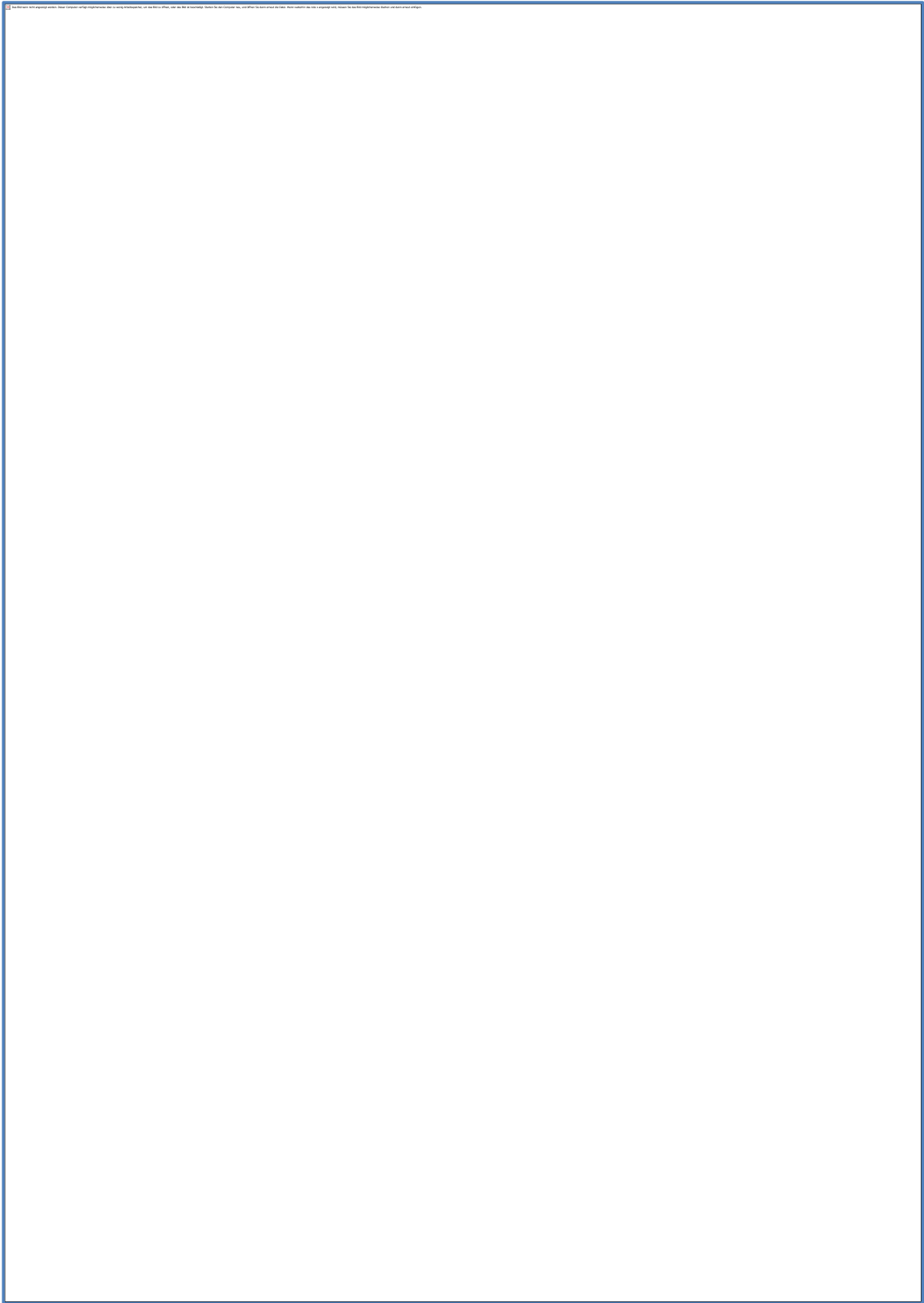


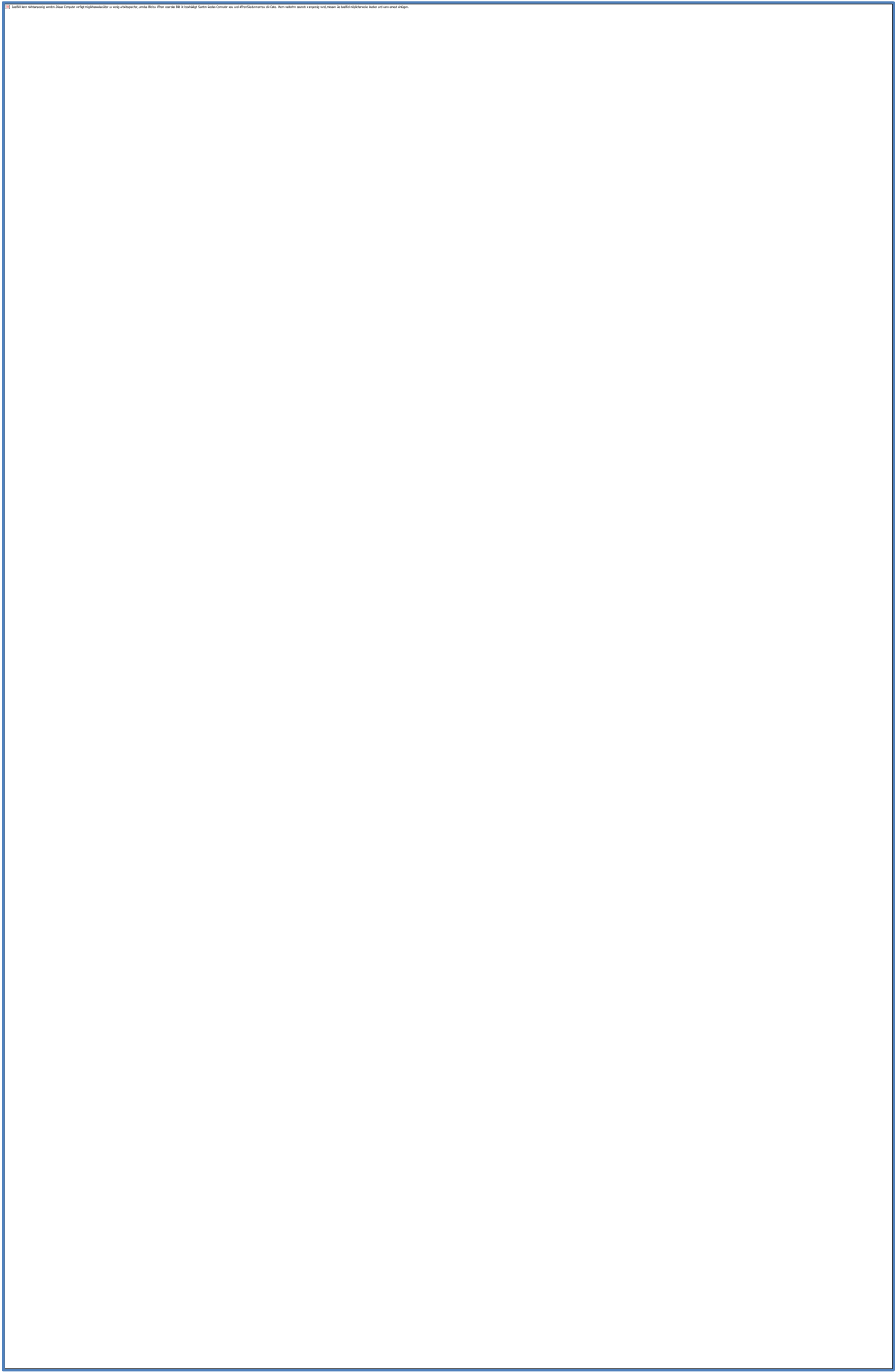


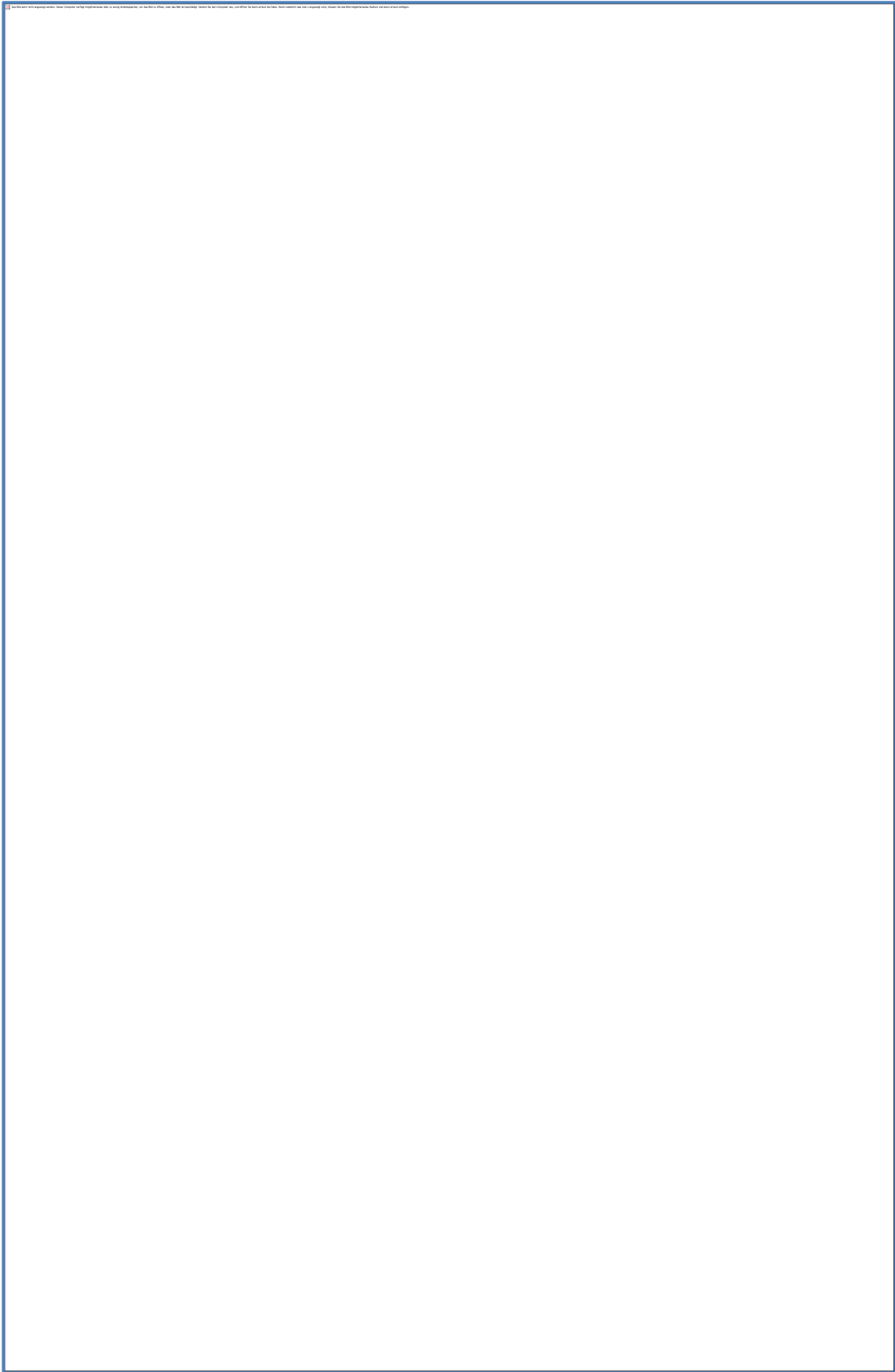


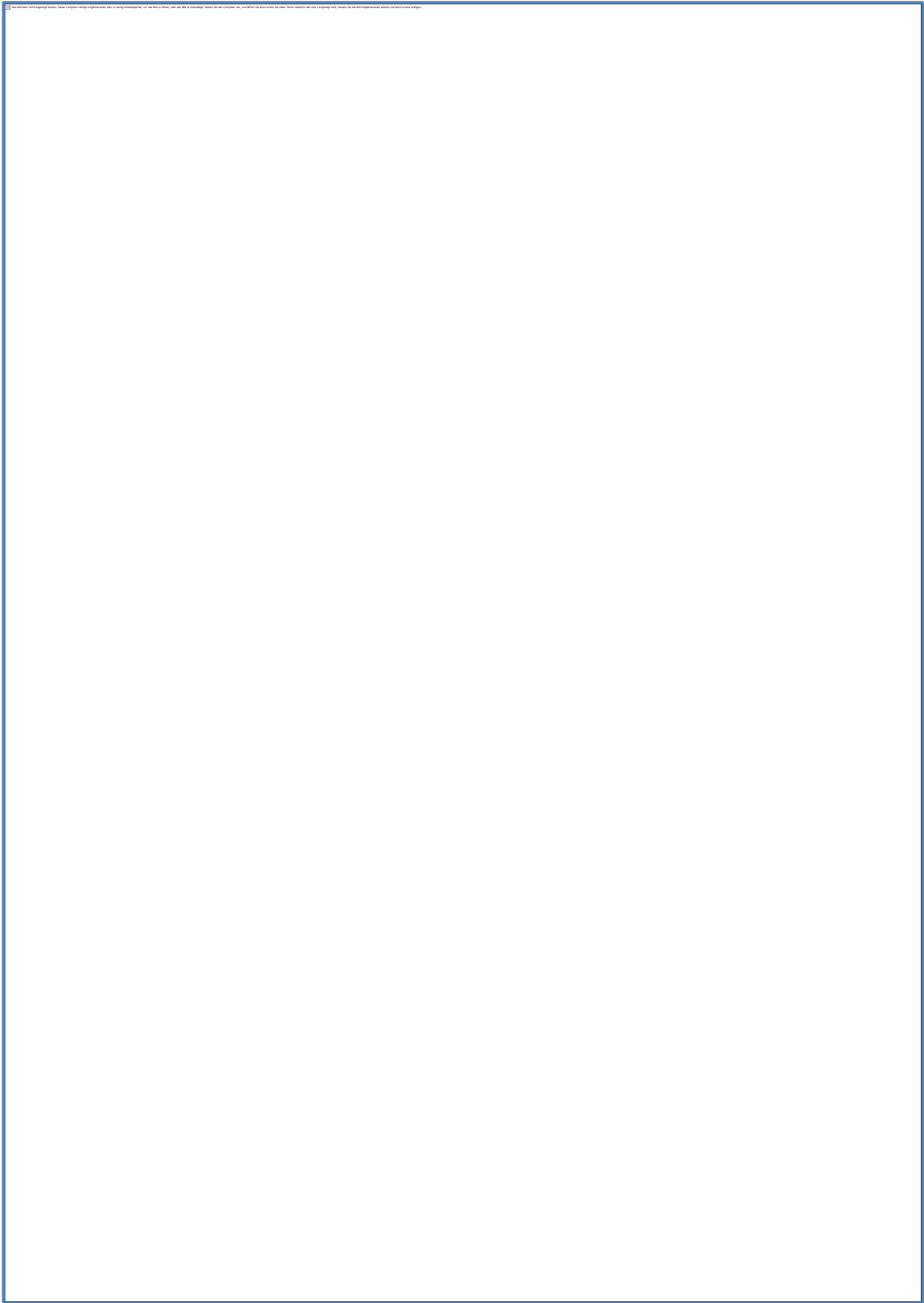


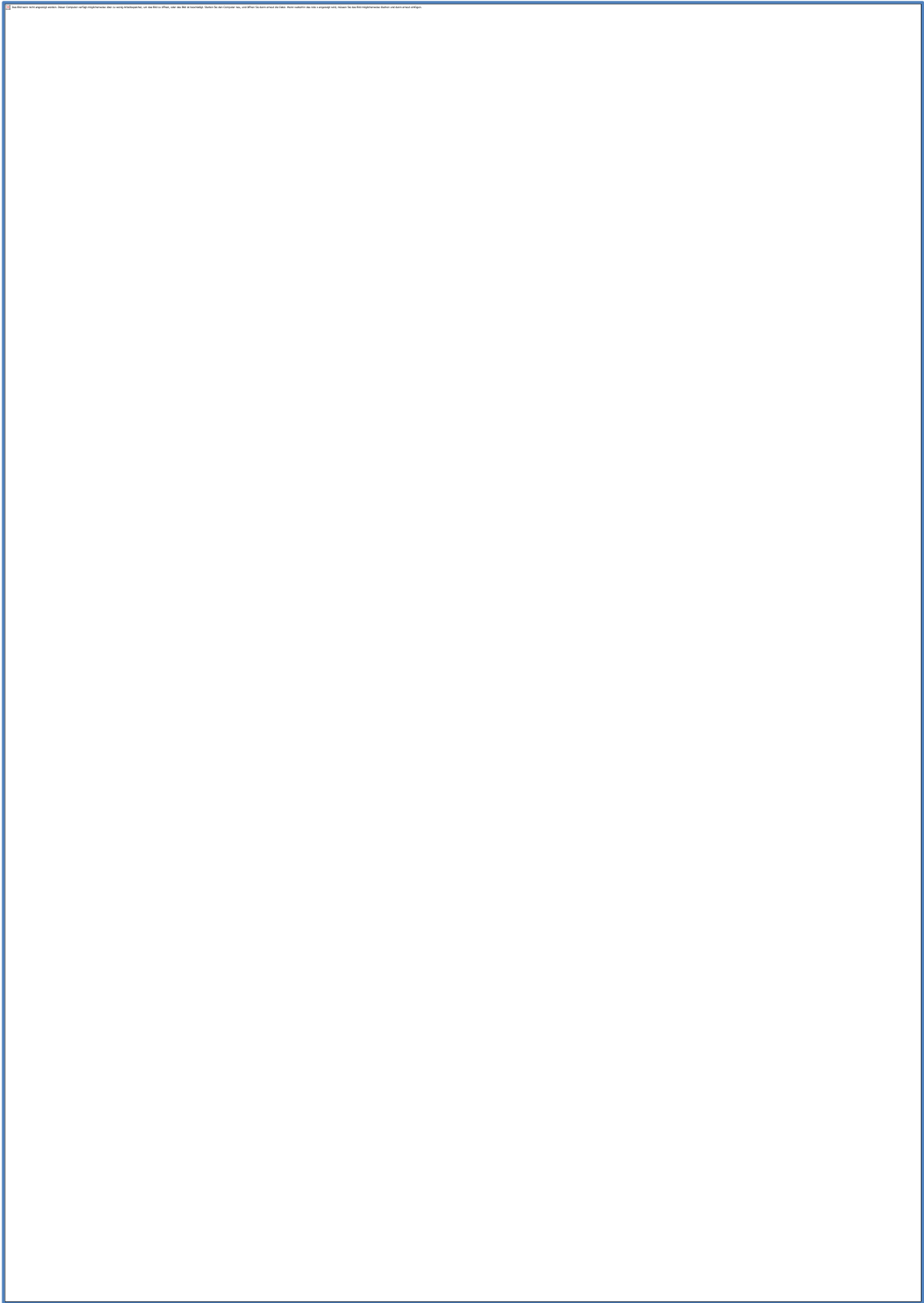


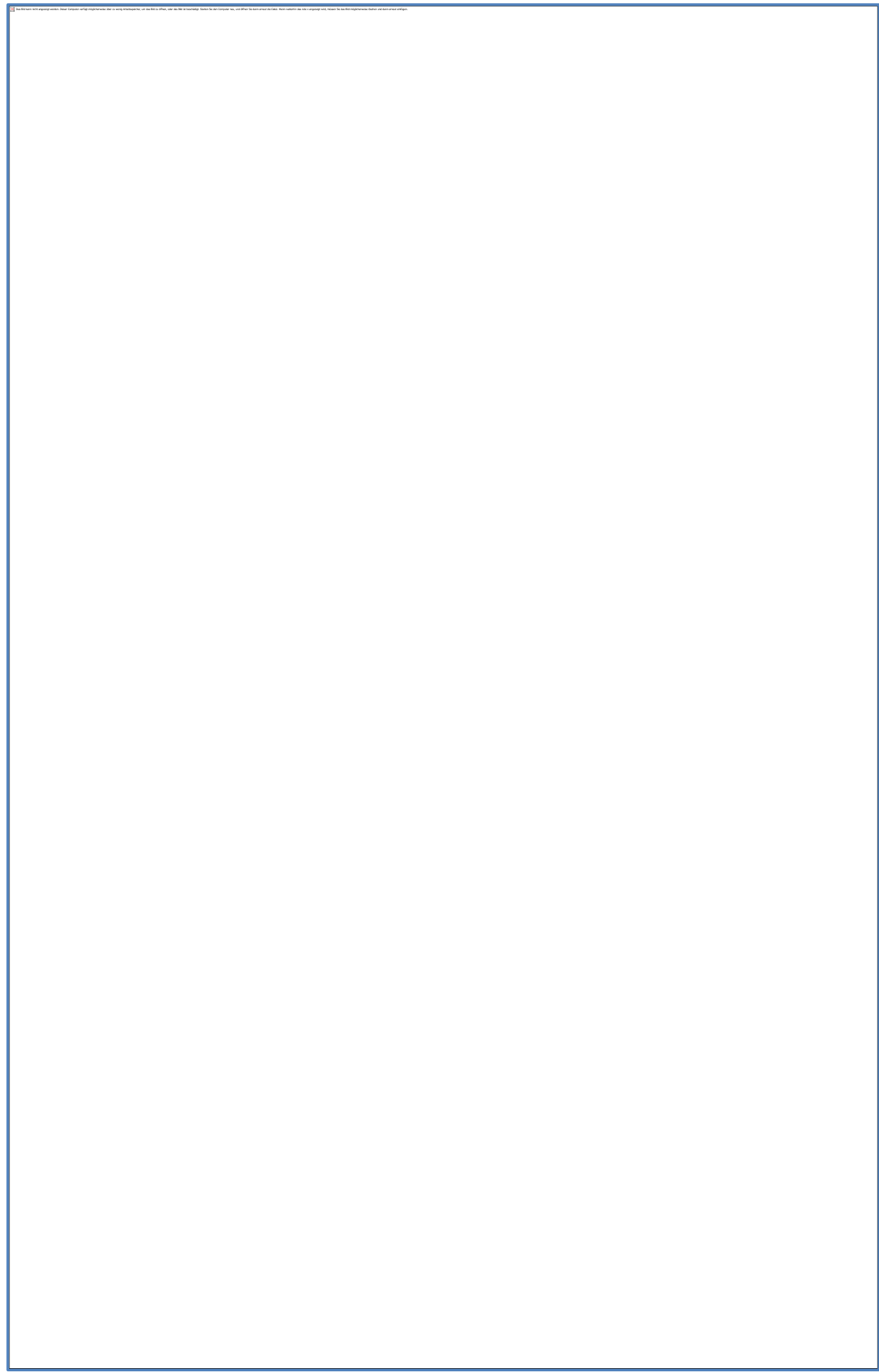


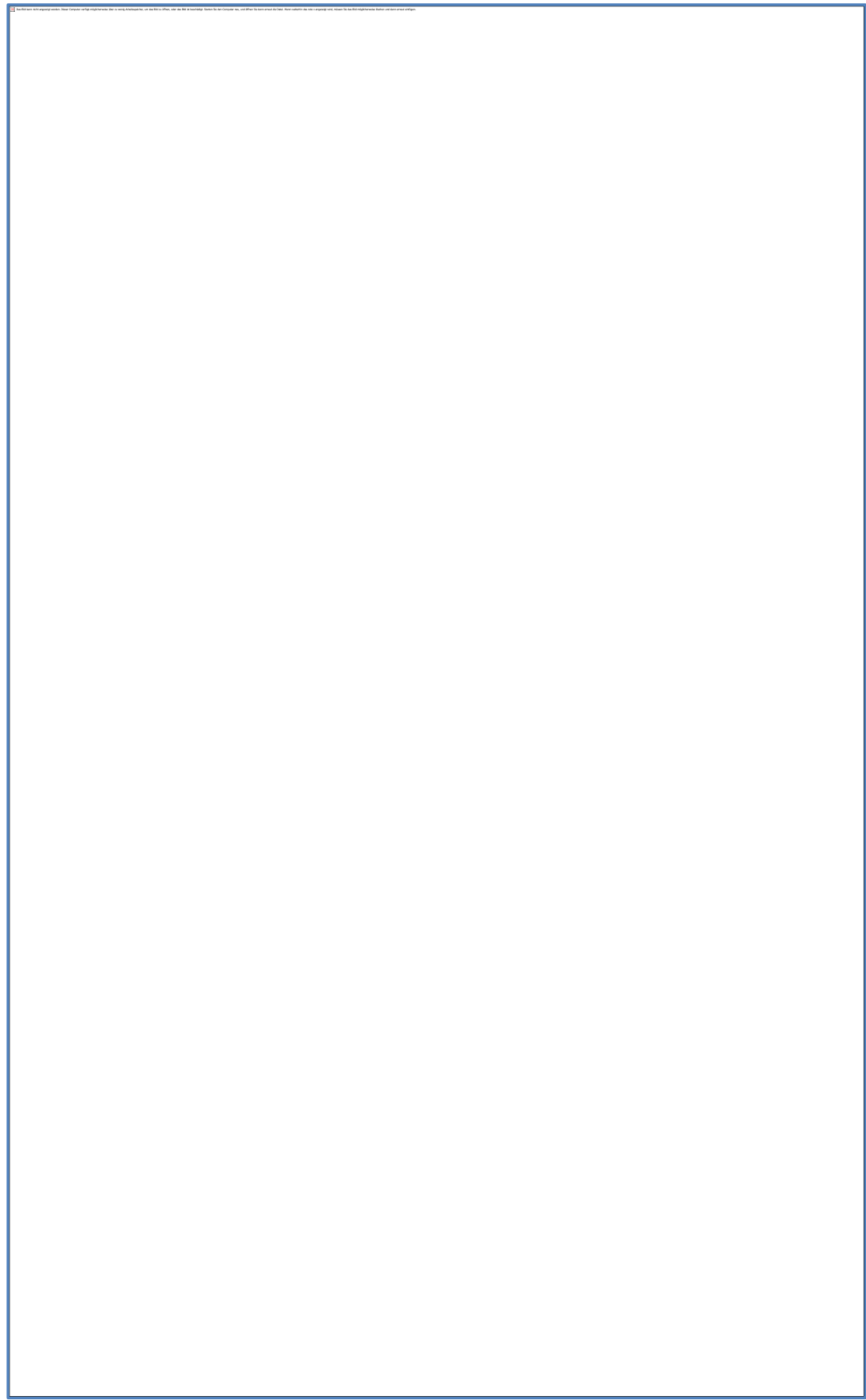


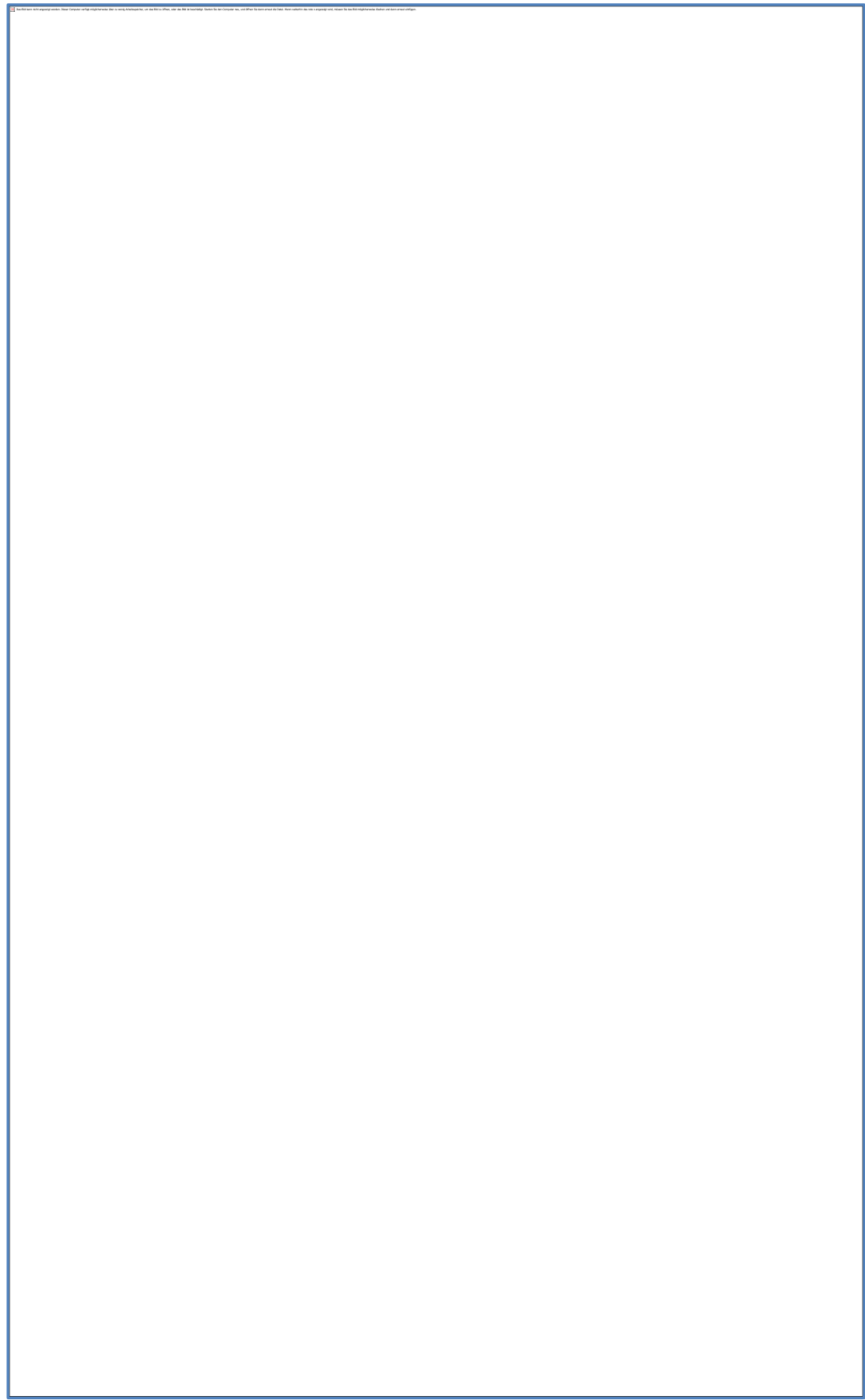


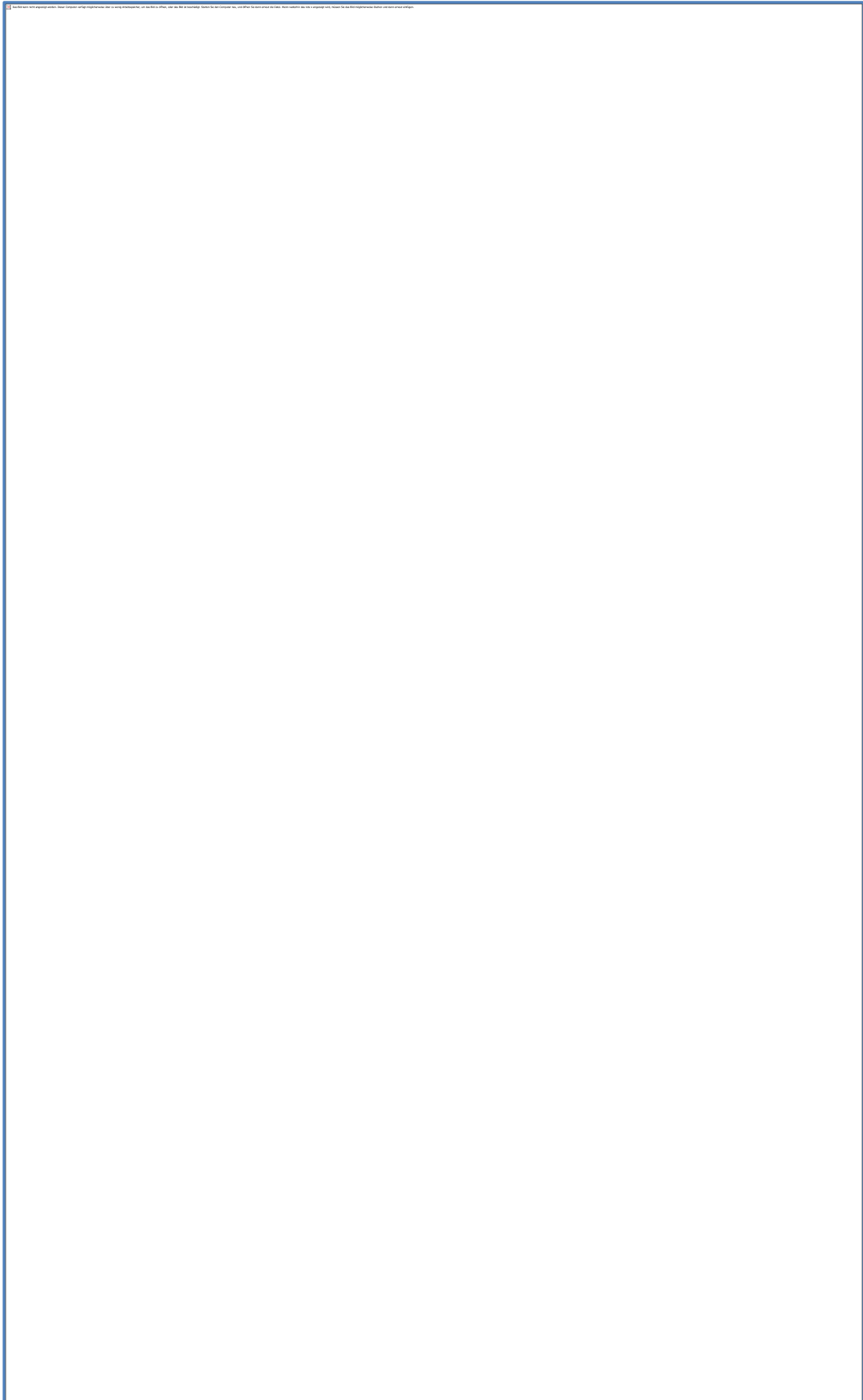


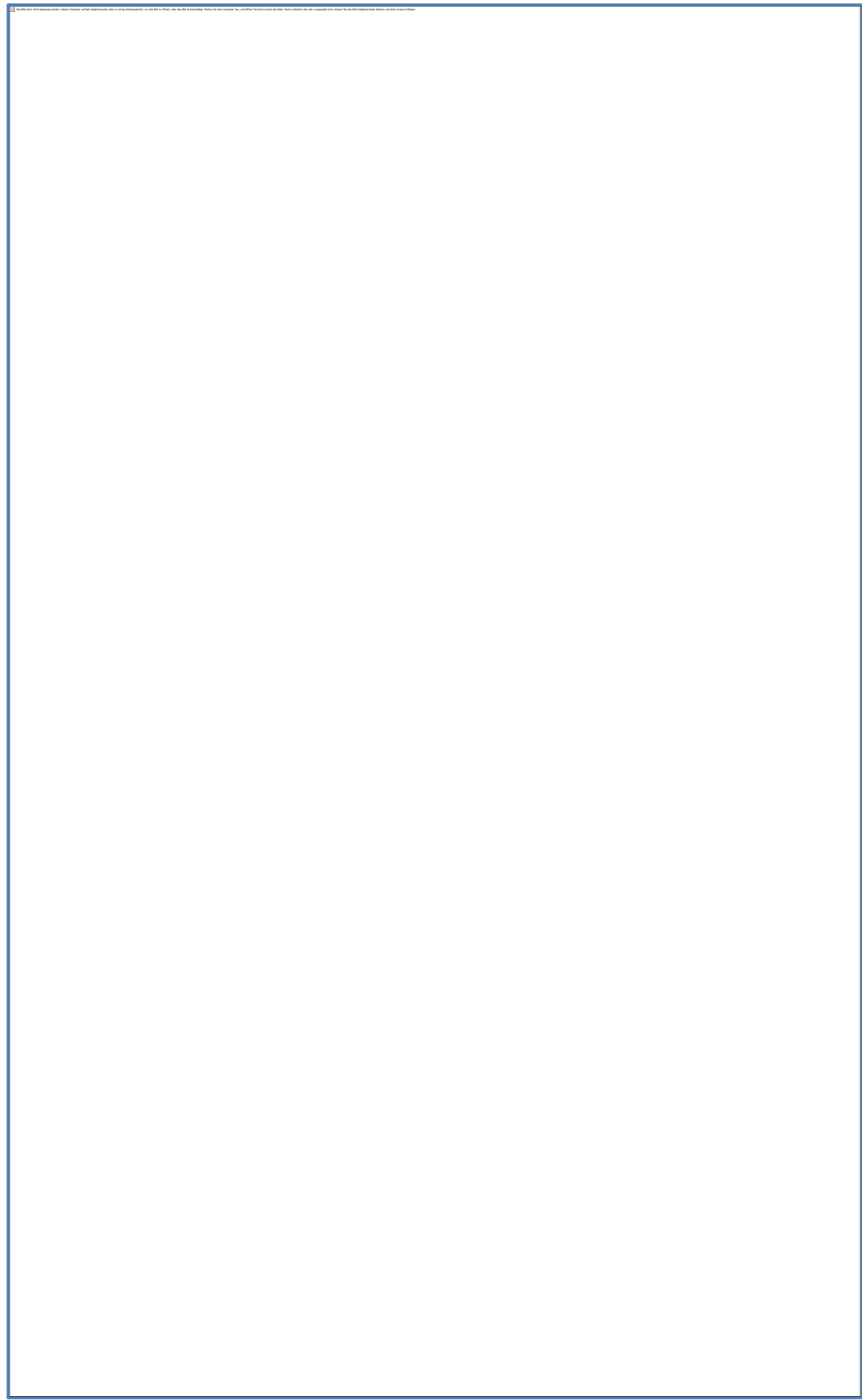












Anhang E.LBF Bericht Nr. 4879, Schwingfestigkeitsversuche für den Stumpfstoß in drei übereinanderliegenden Gurt- platten

Ansprechpartner bei der Deutschen Bahn AG für den Forschungsbericht ist:

Michael Albert

Vorstandsressort Technik

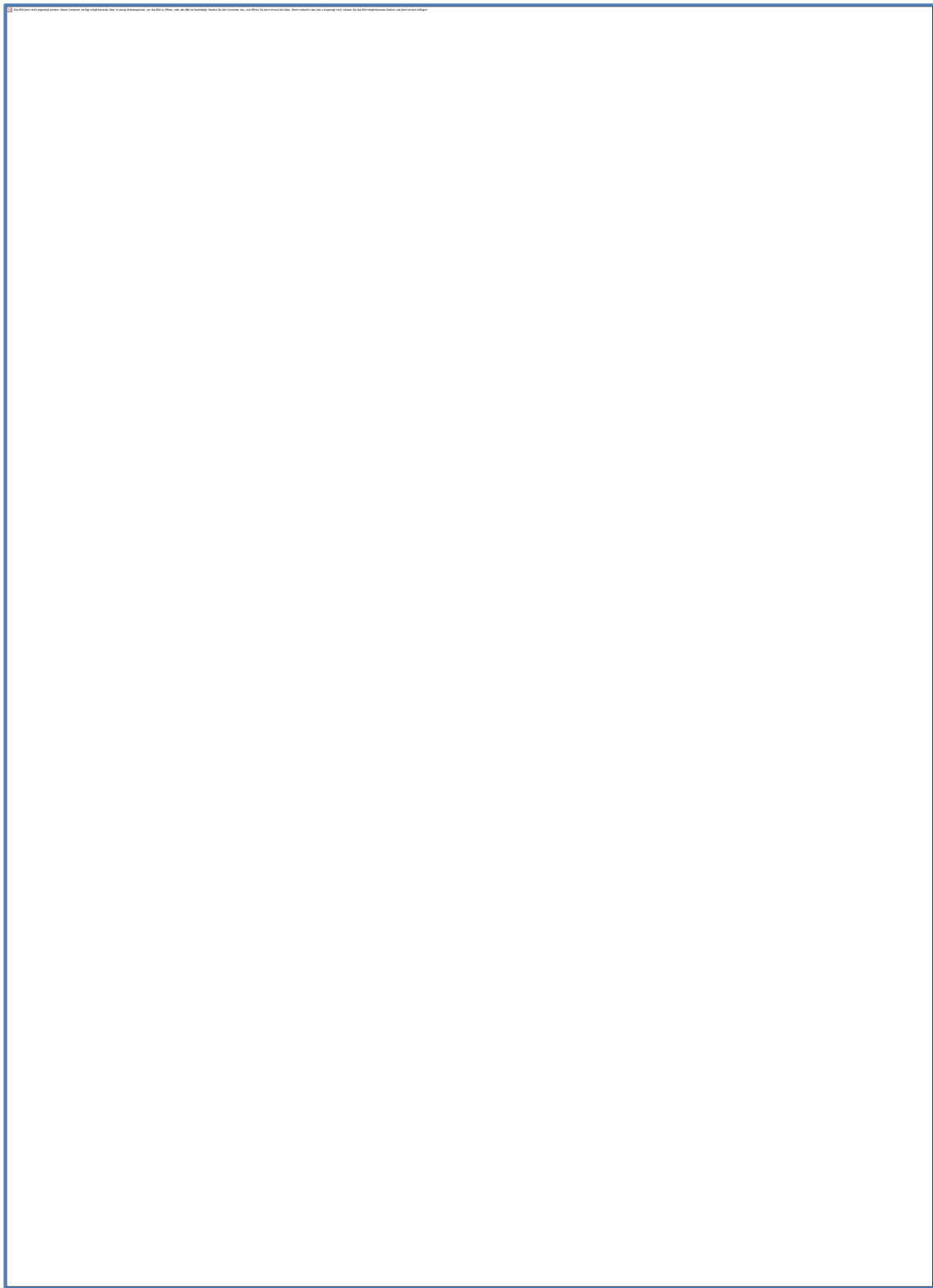
Systemverbund und Dienstleistungen

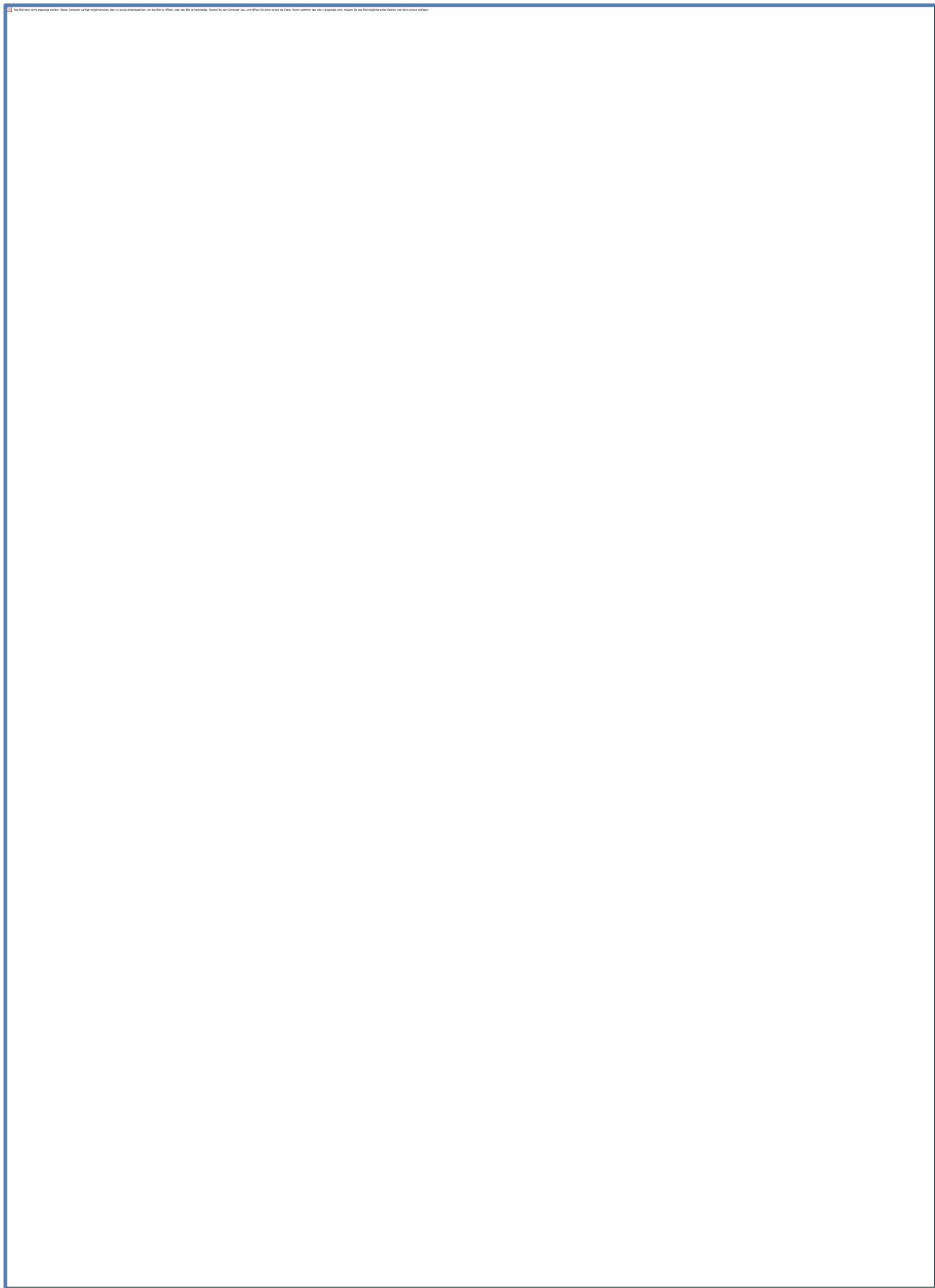
Technik Bauliche Anlagen (TEC 3)

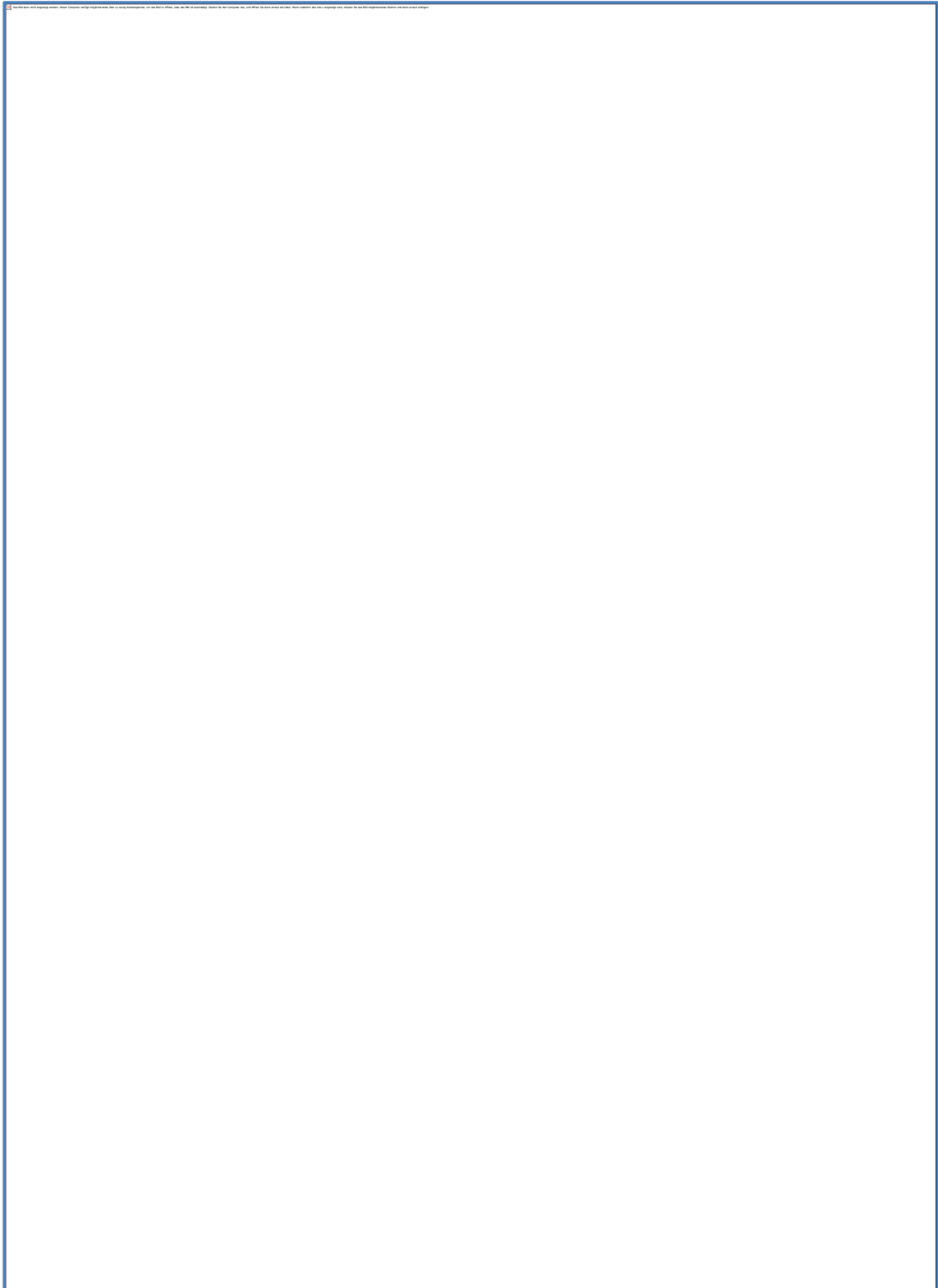
Deutsche Bahn AG Richelstraße 3, 80634 München

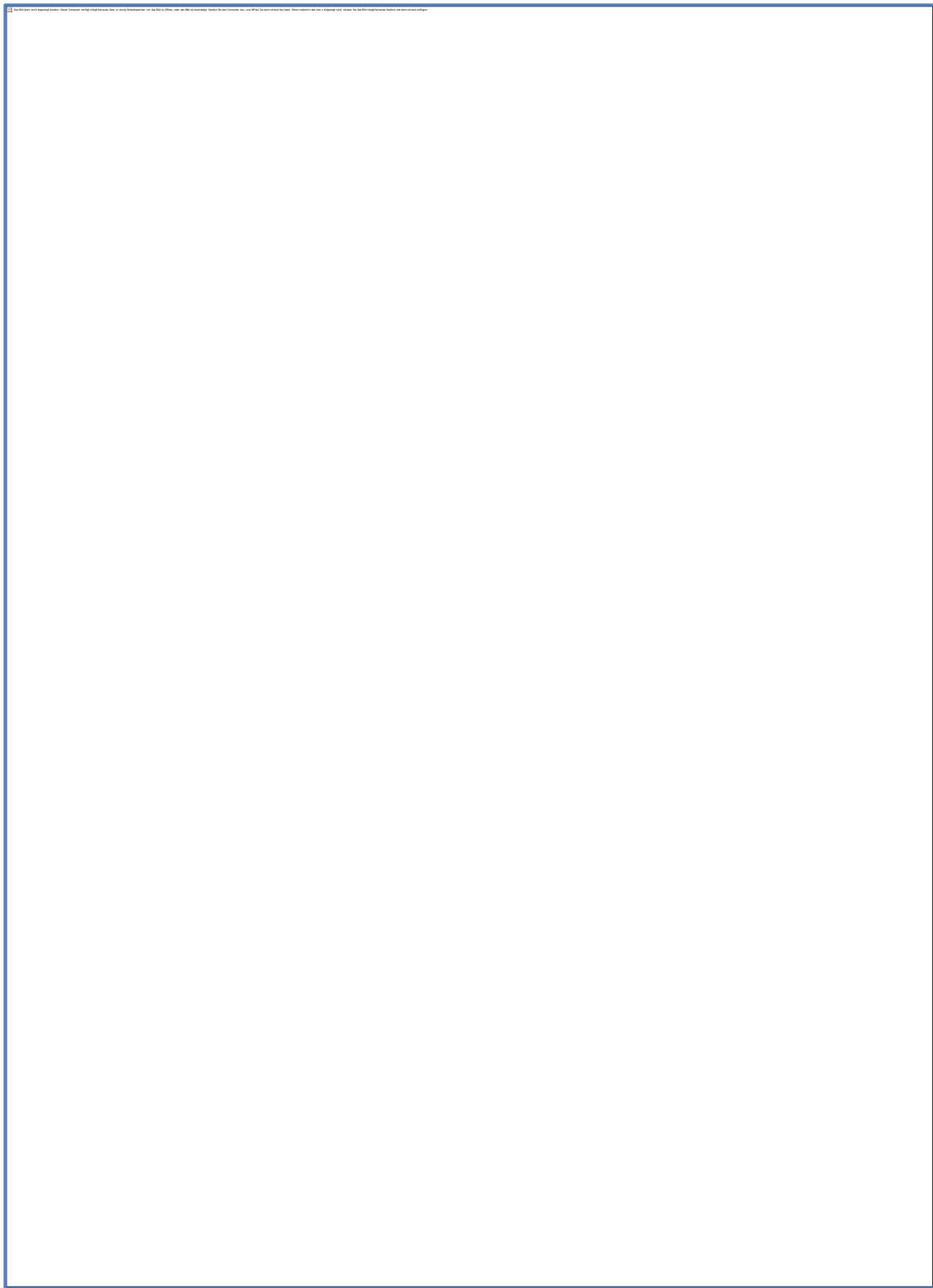
Tel. +49 (0)89 1308-5930, Fax -2405

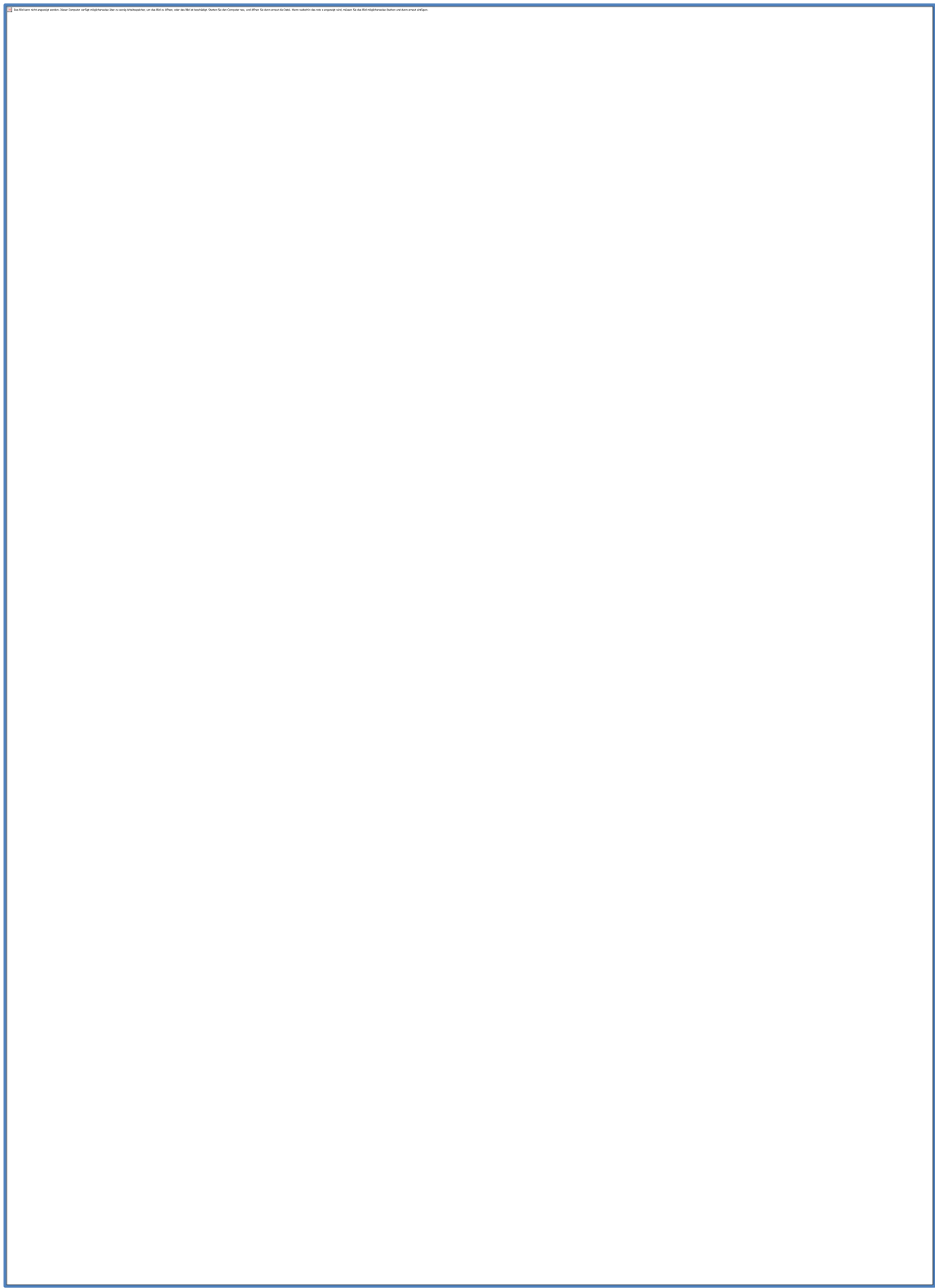
Michael.Albert@deutschebahn.com

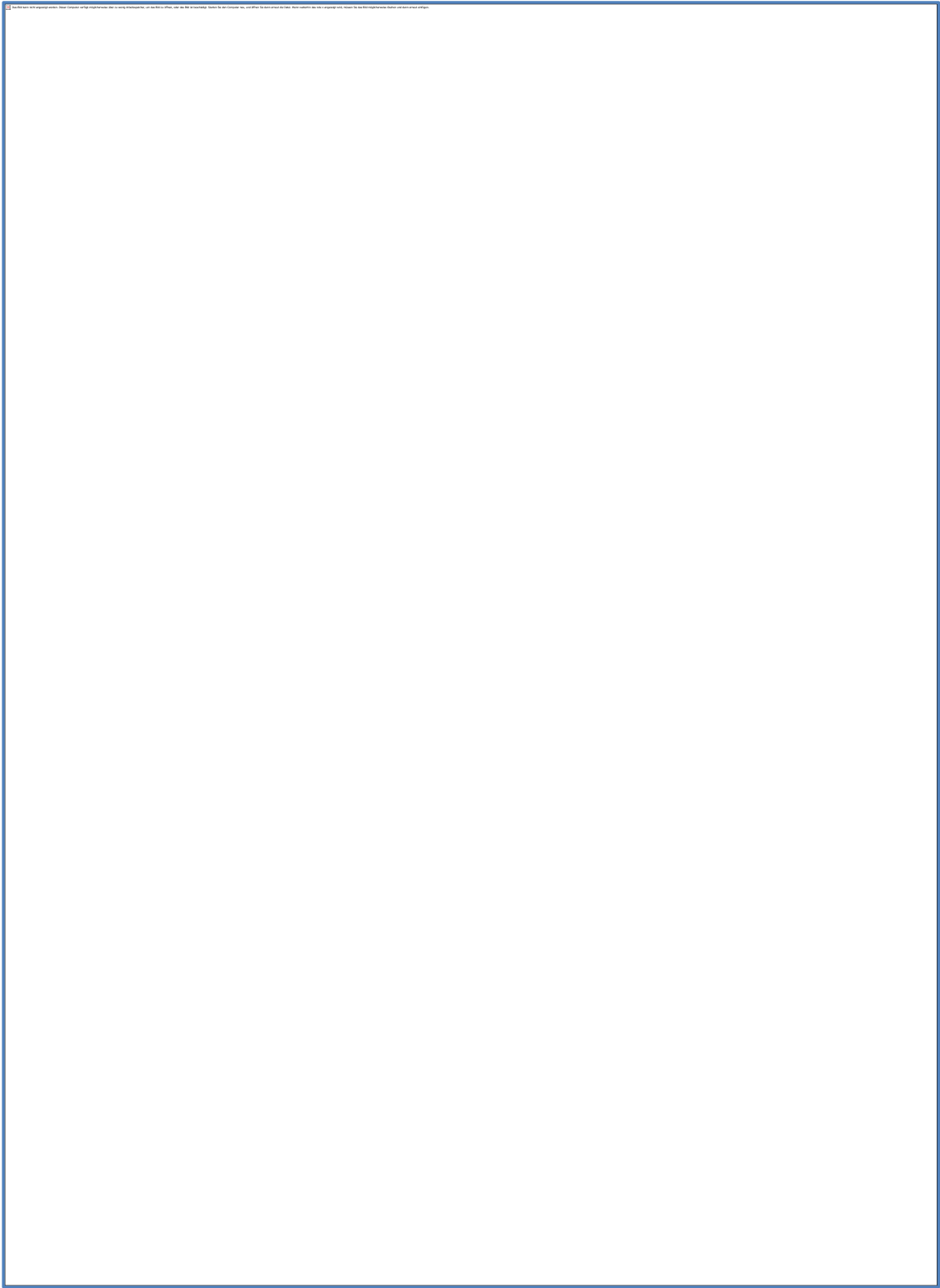


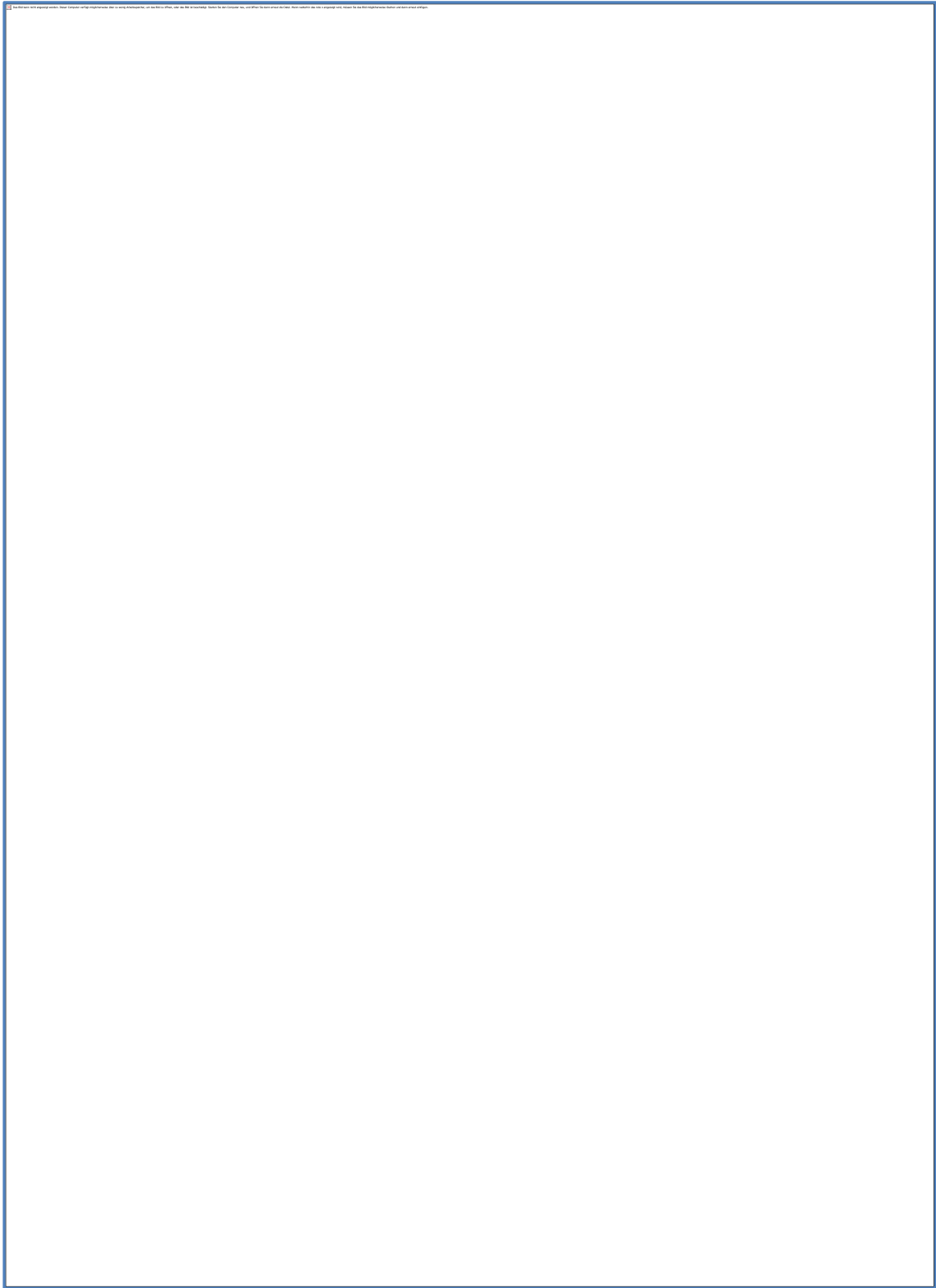


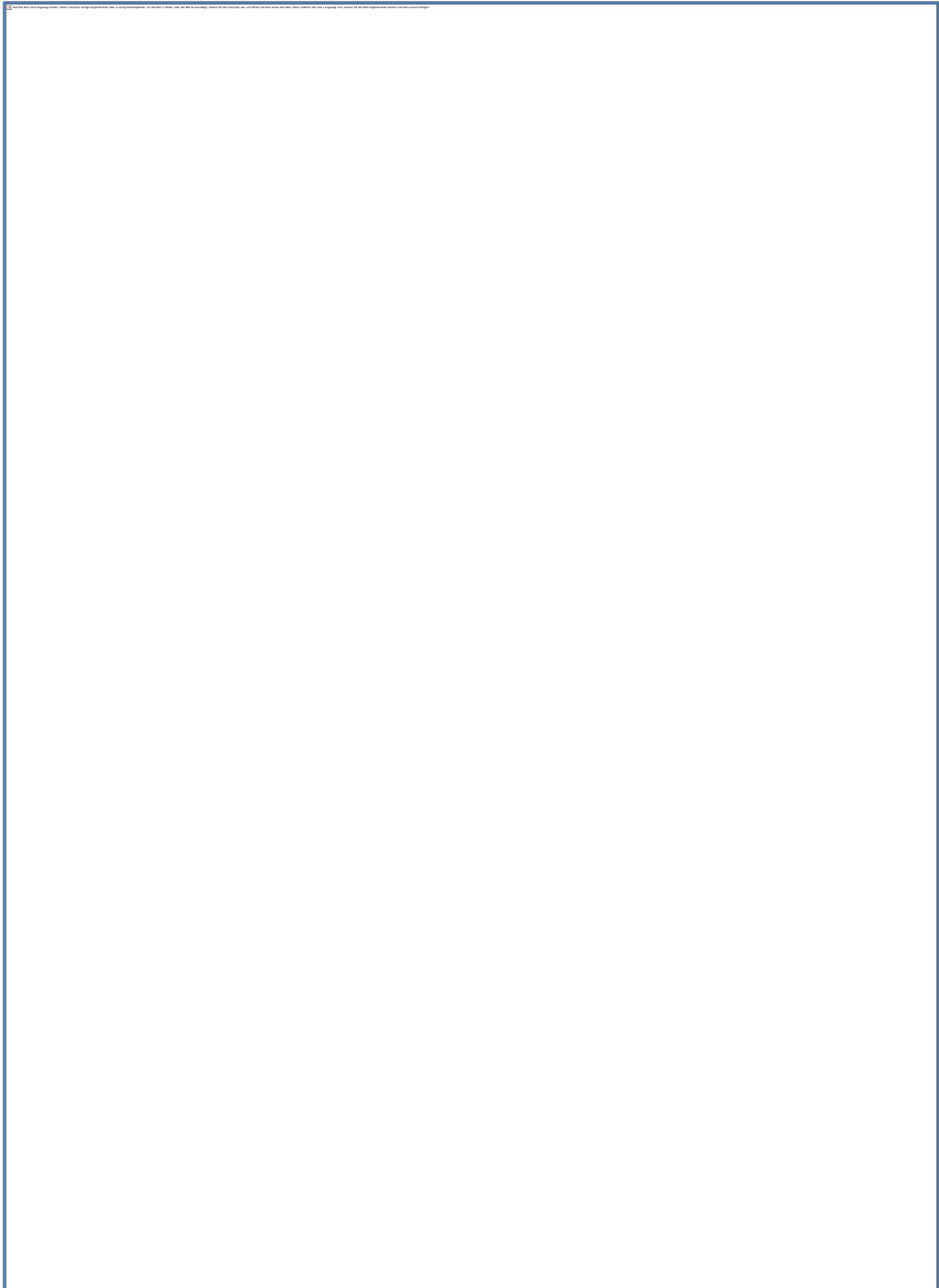


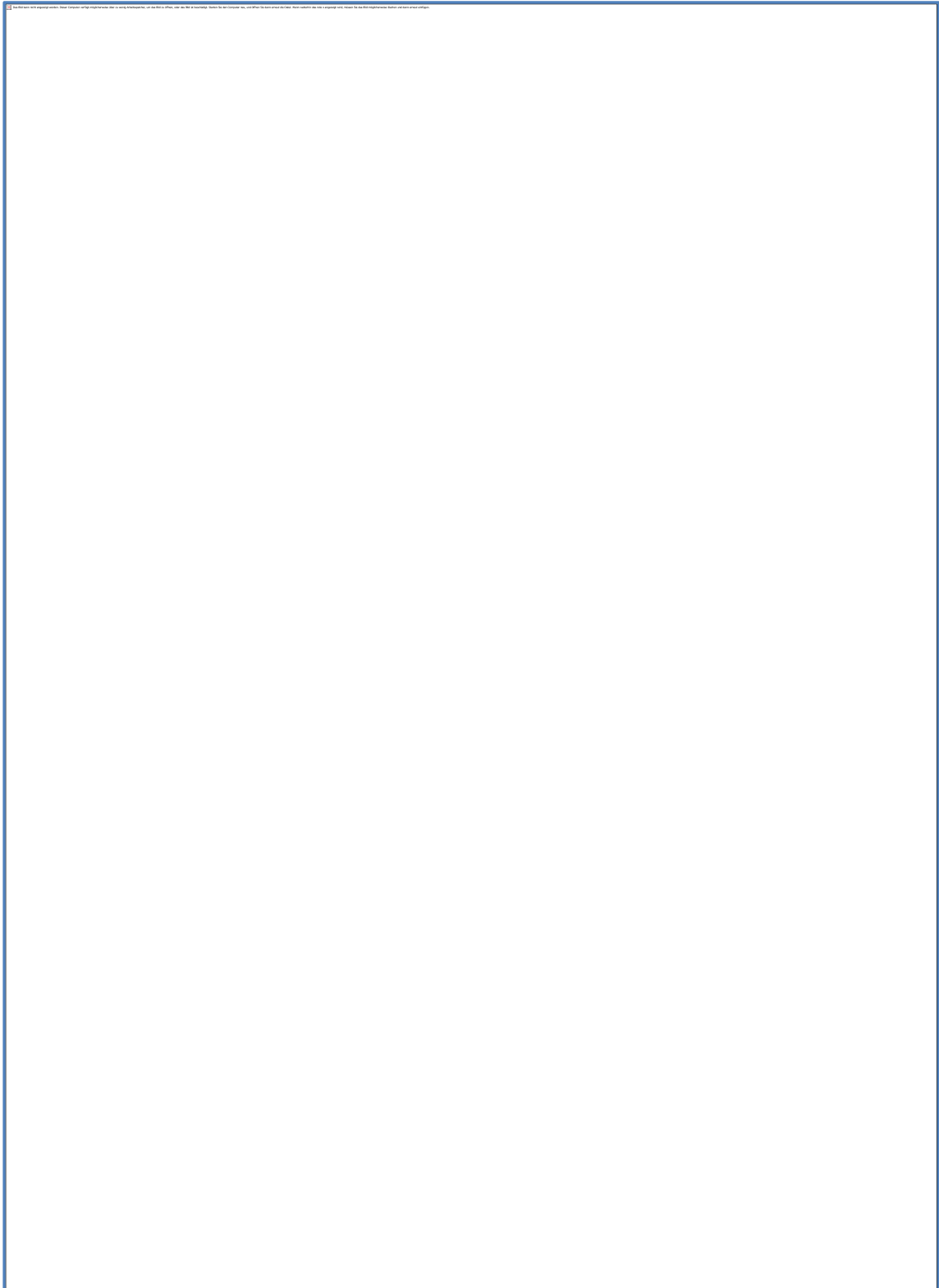


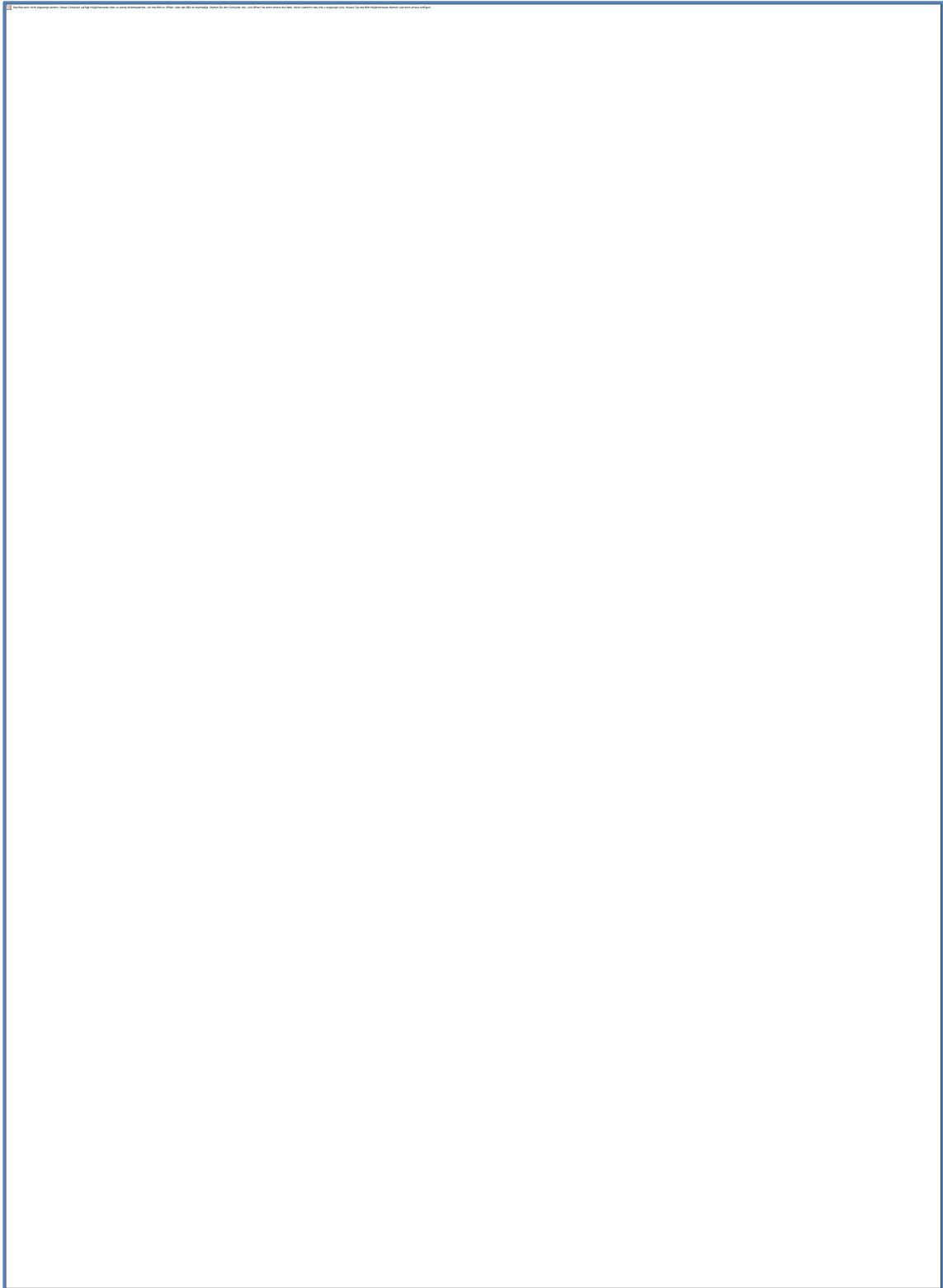


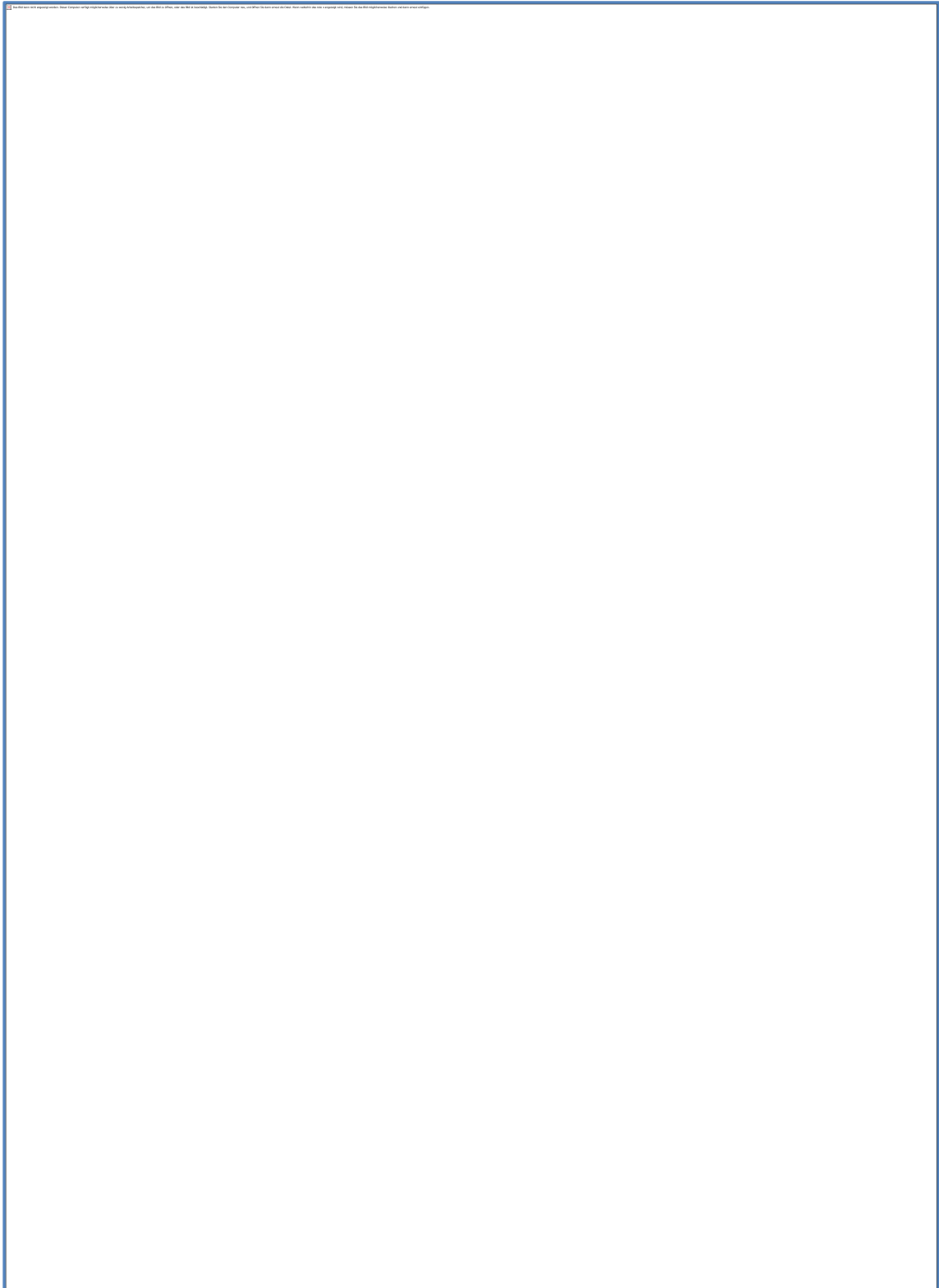


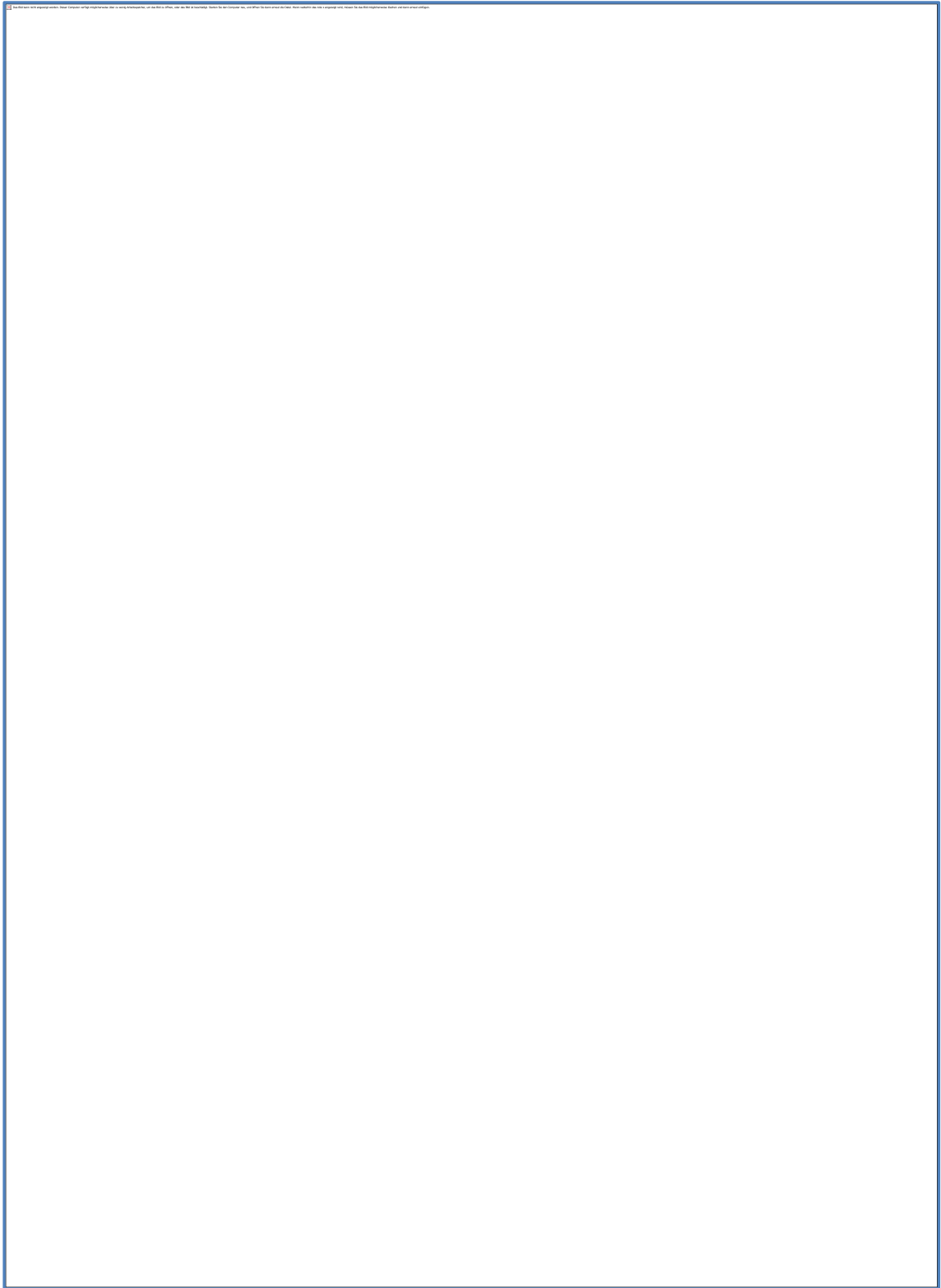


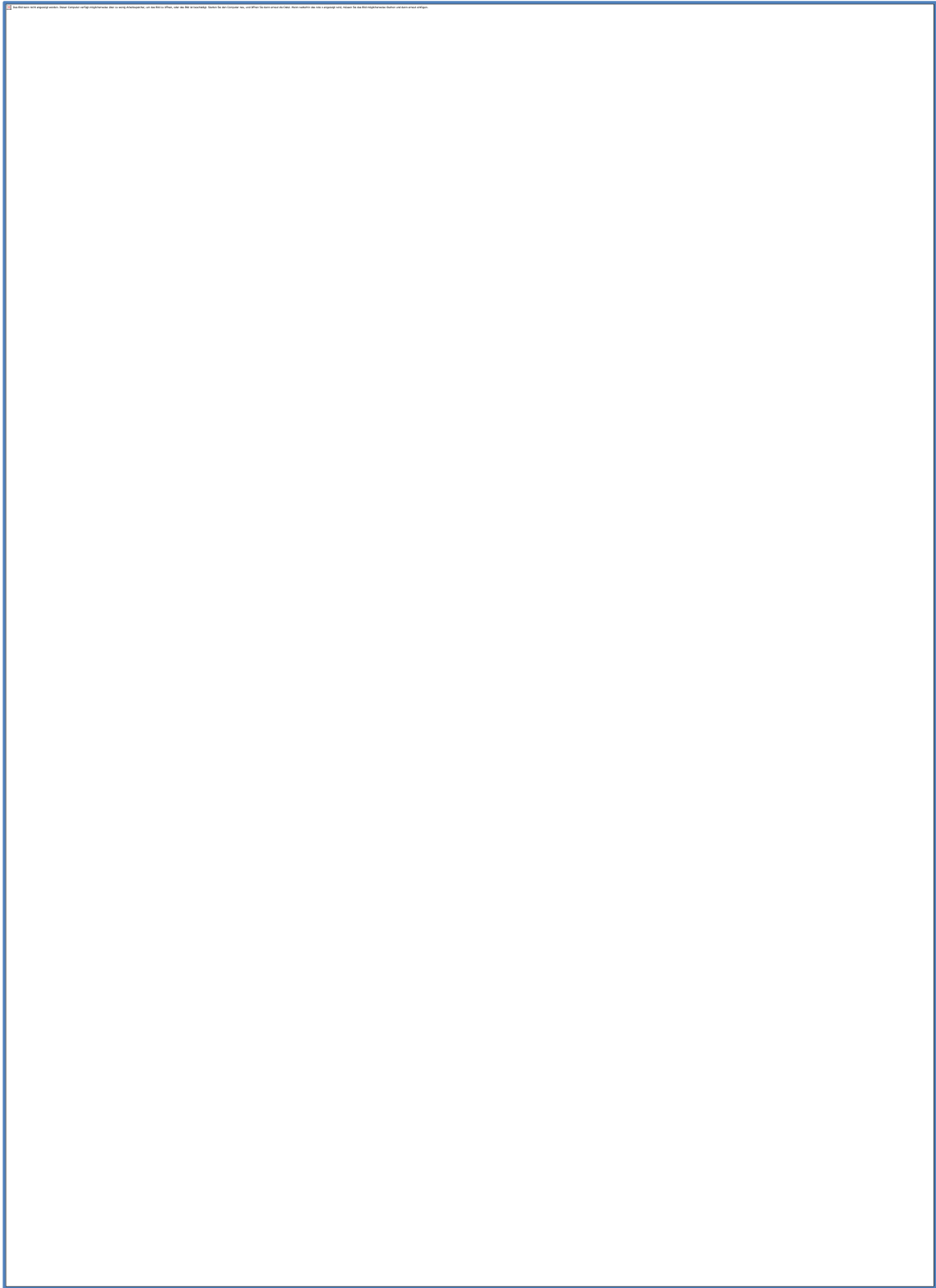


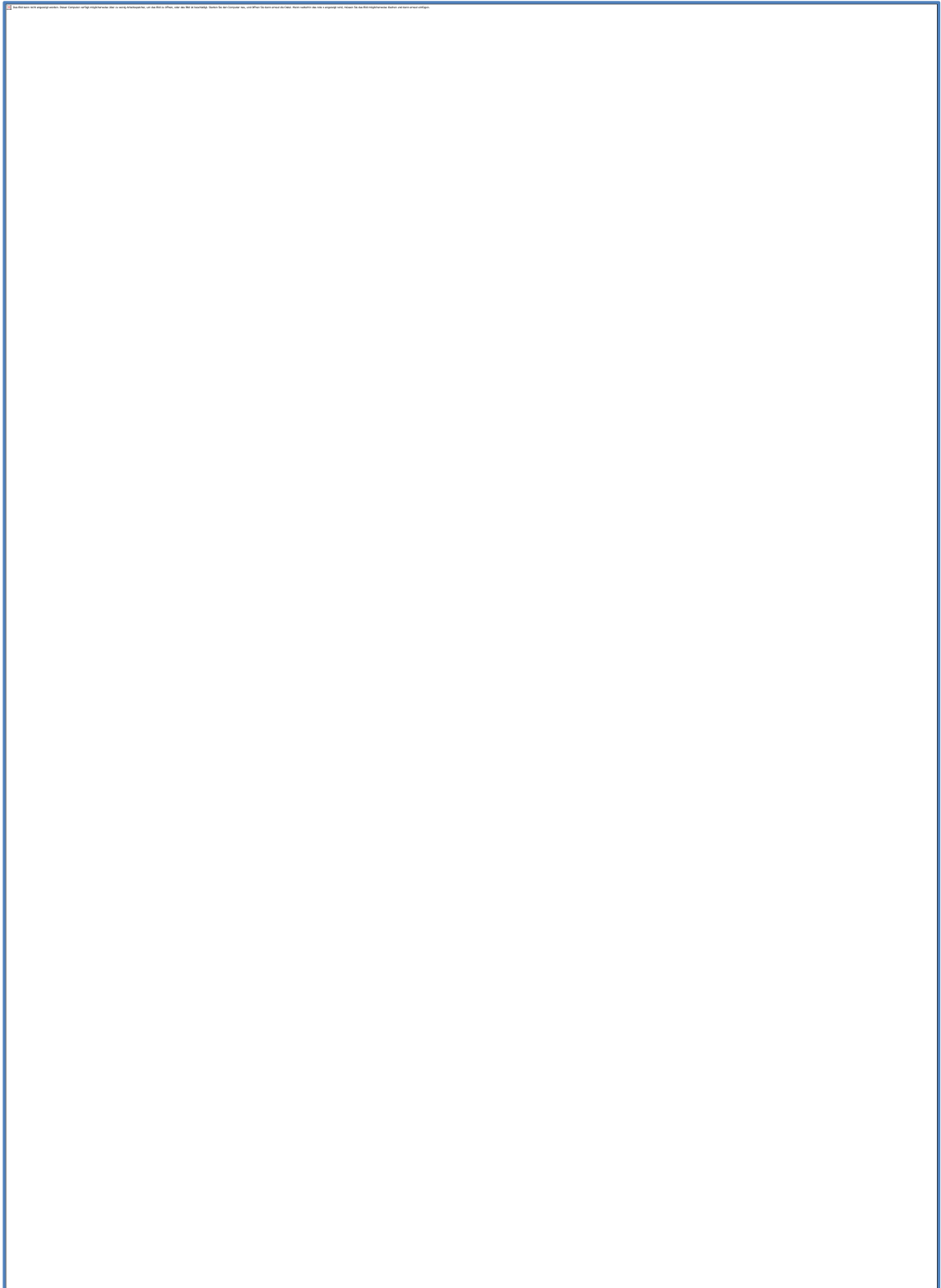


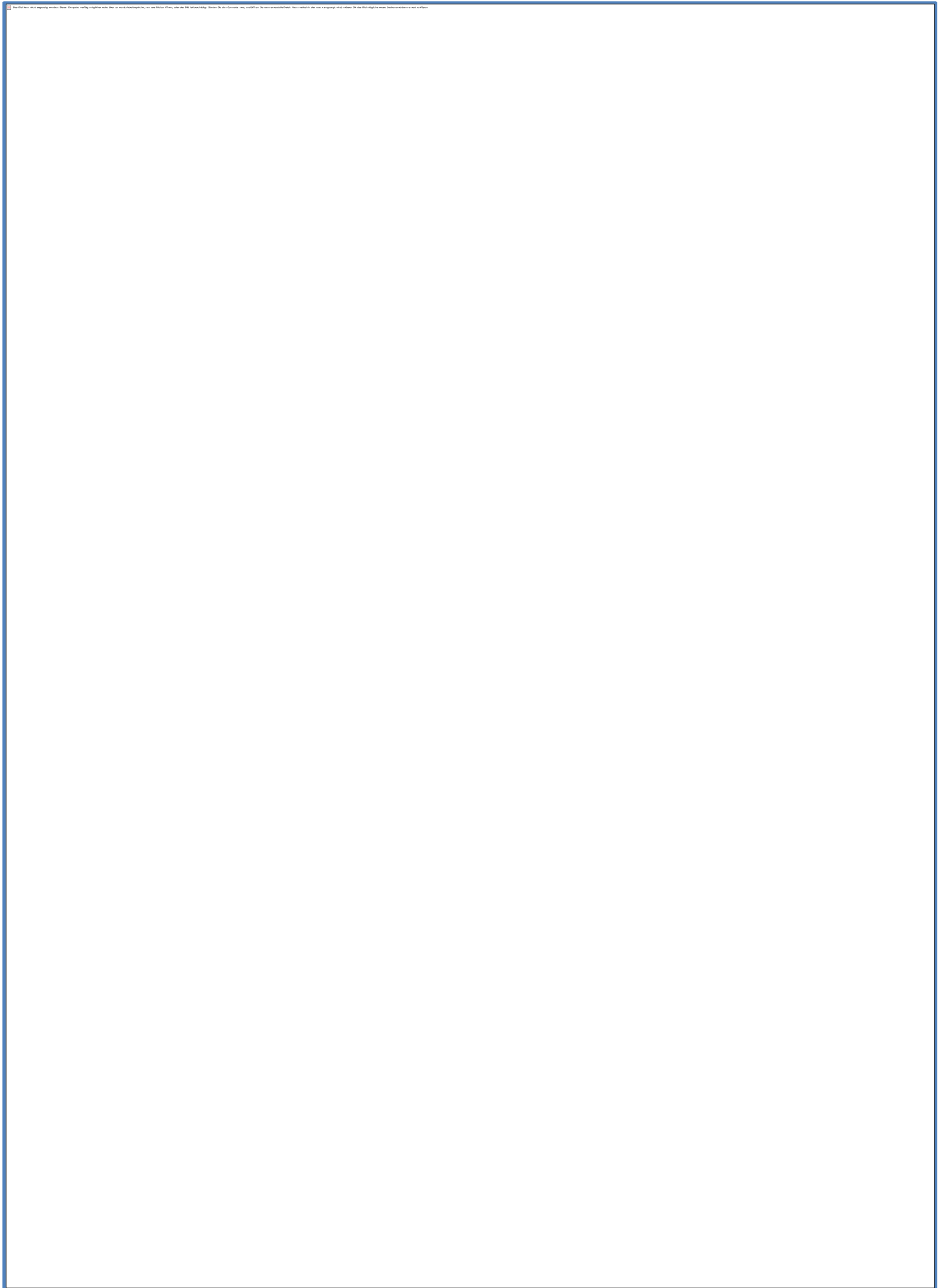


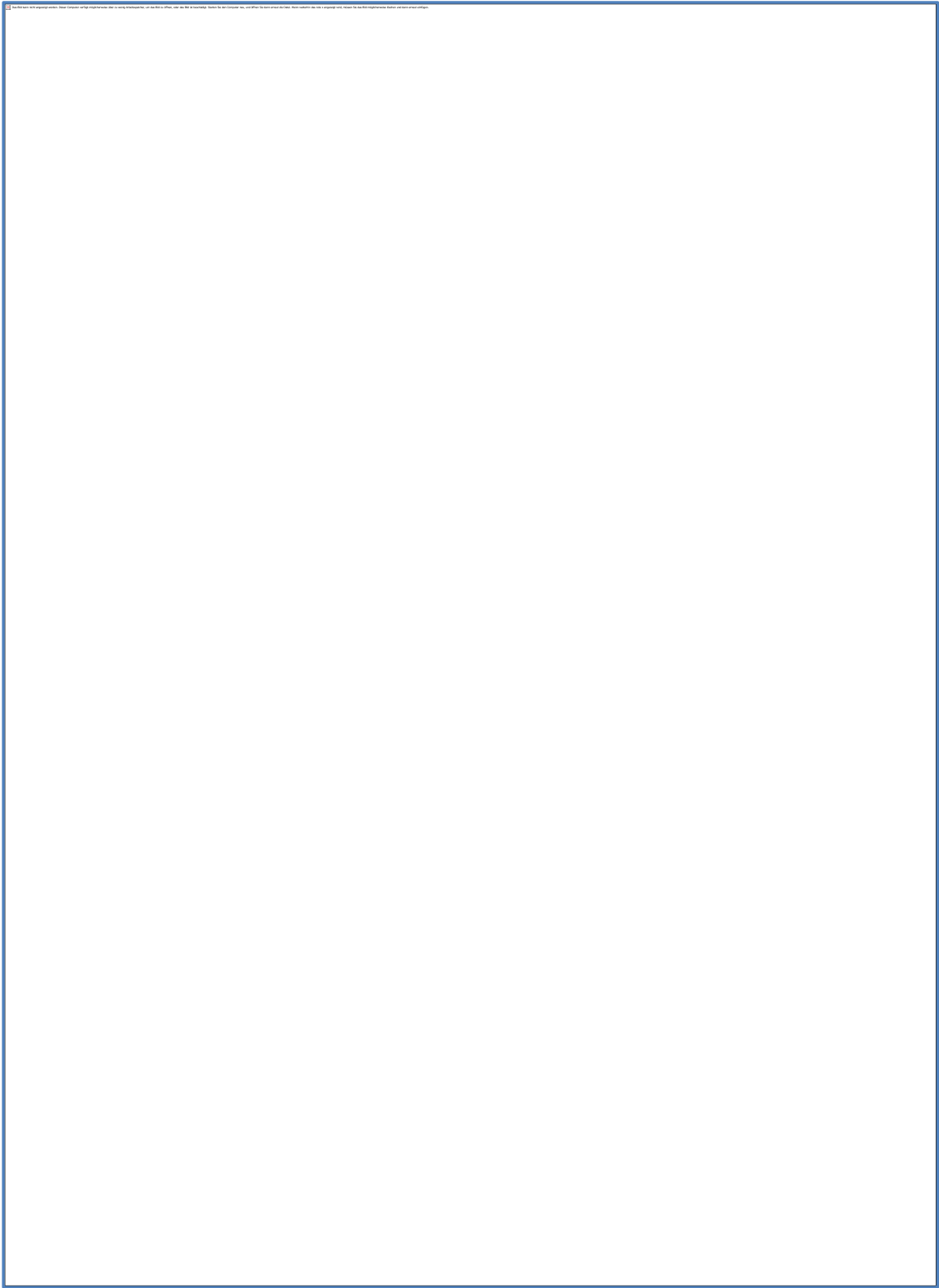


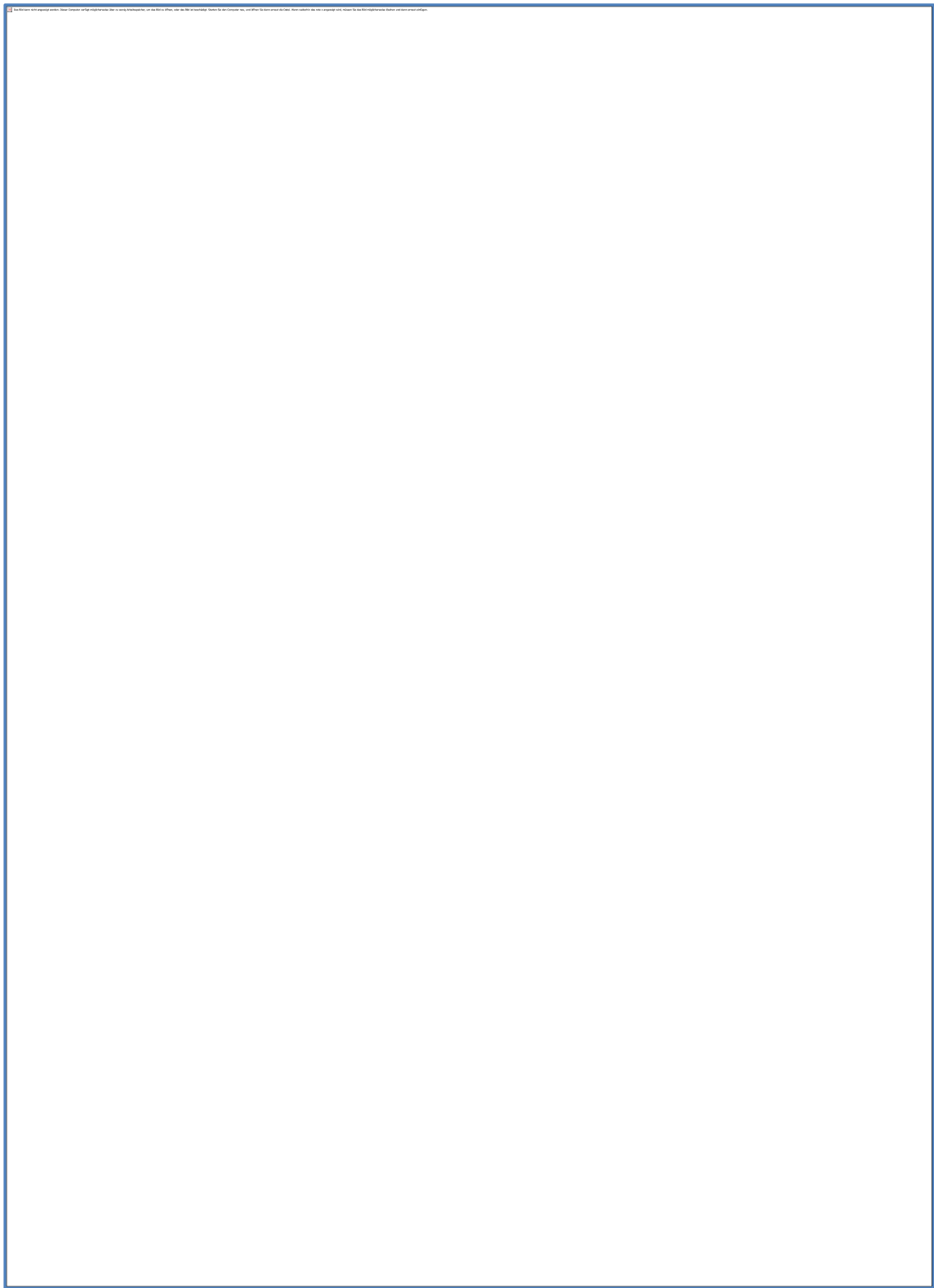


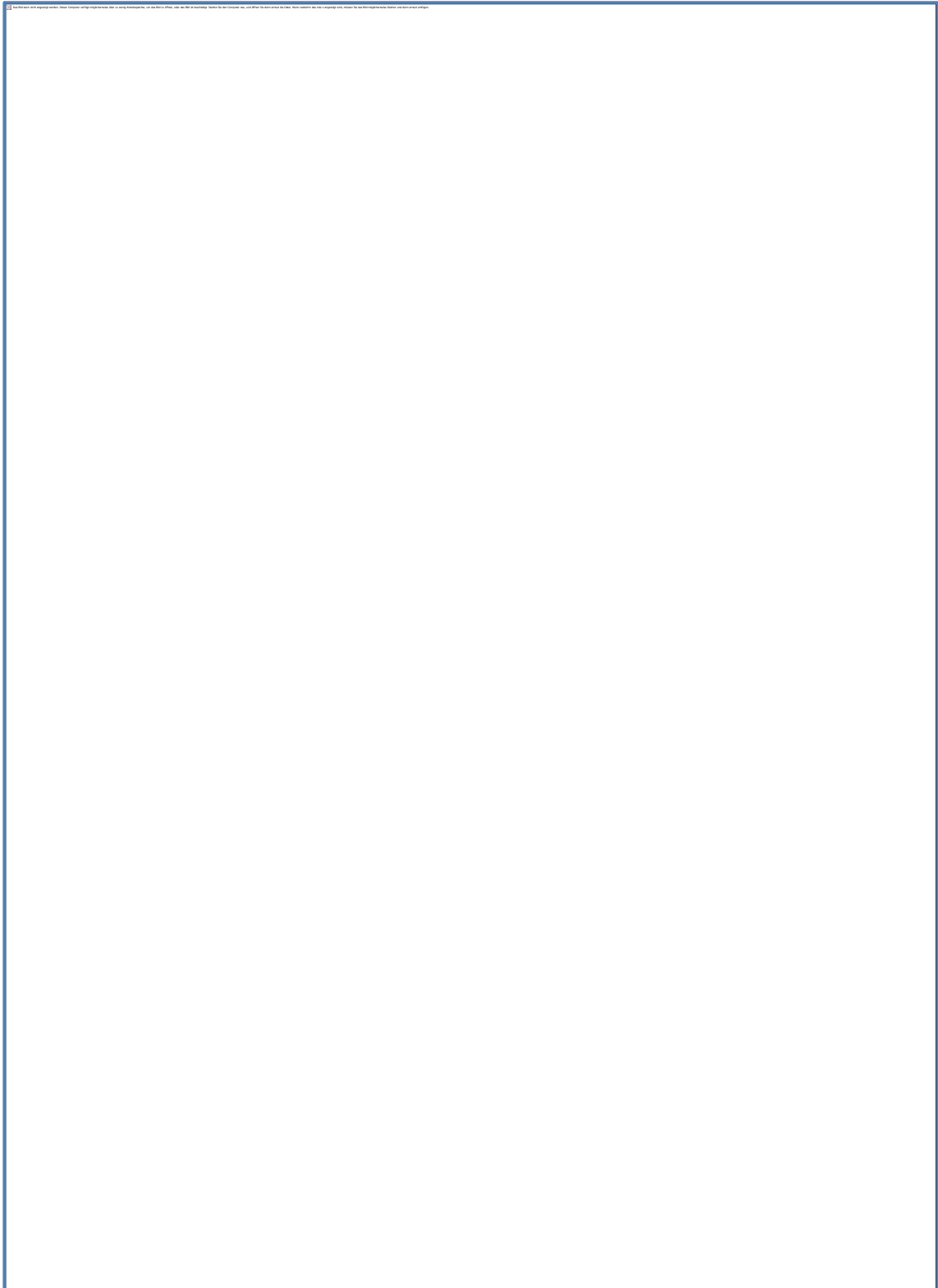


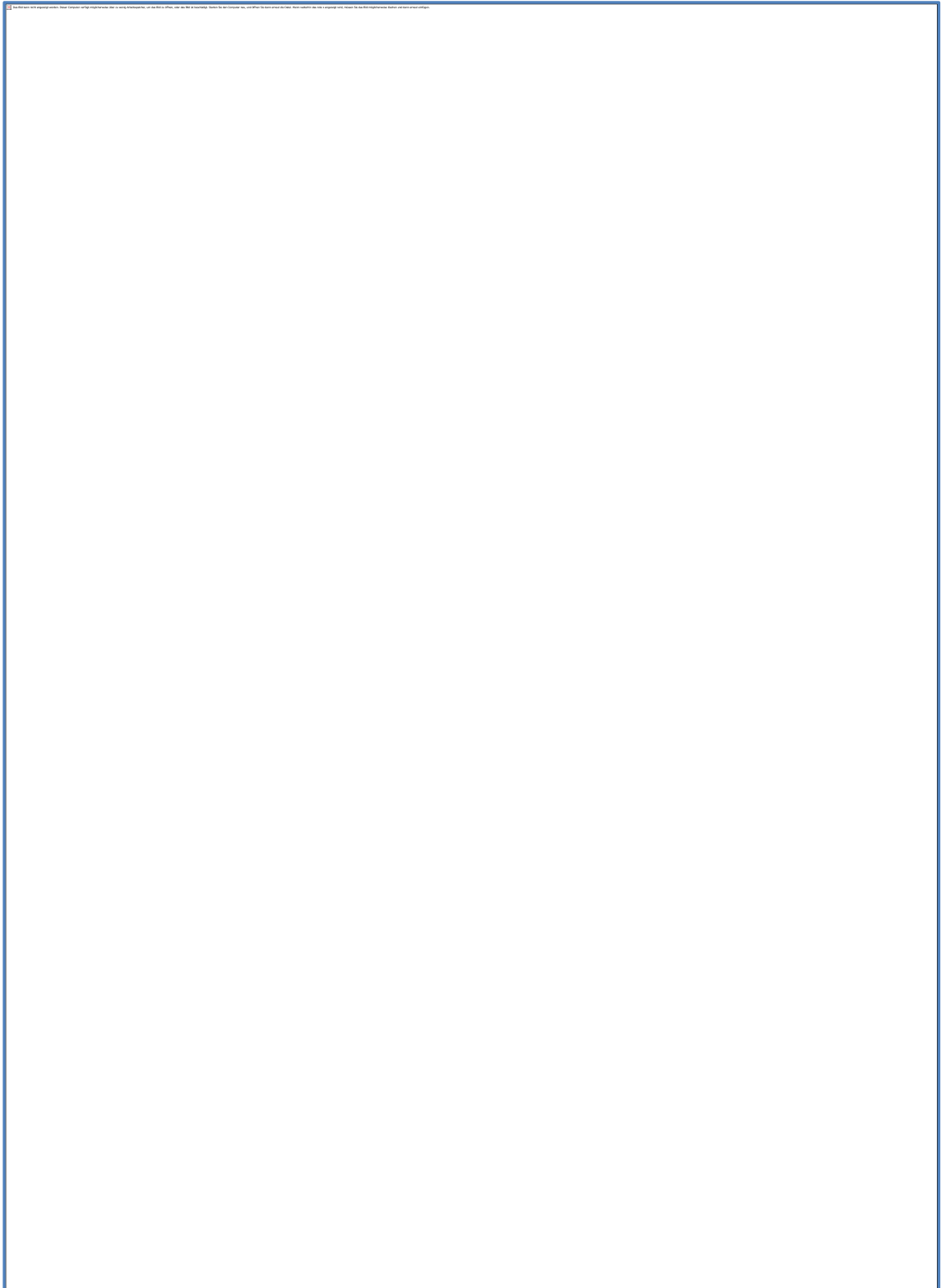


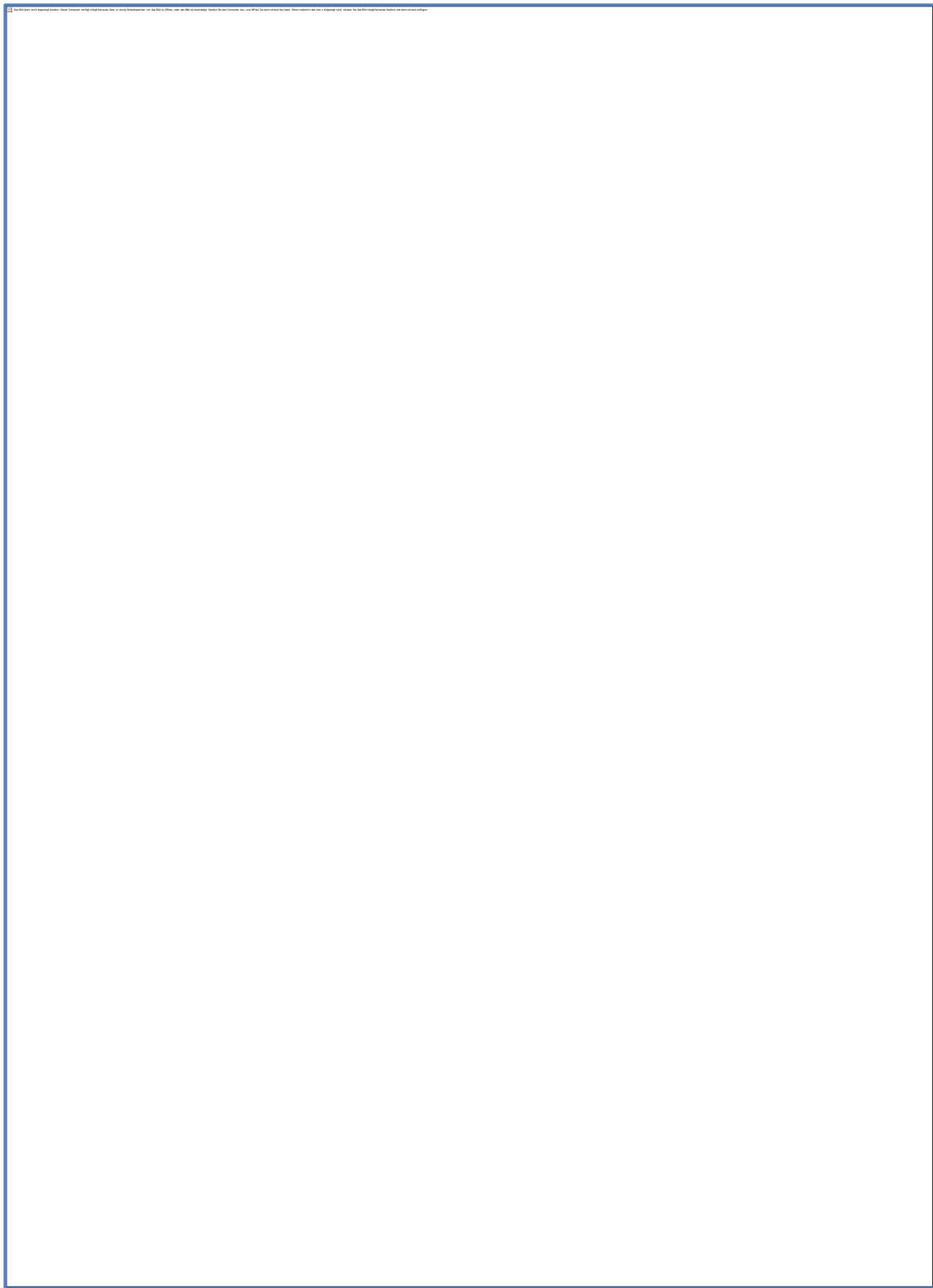


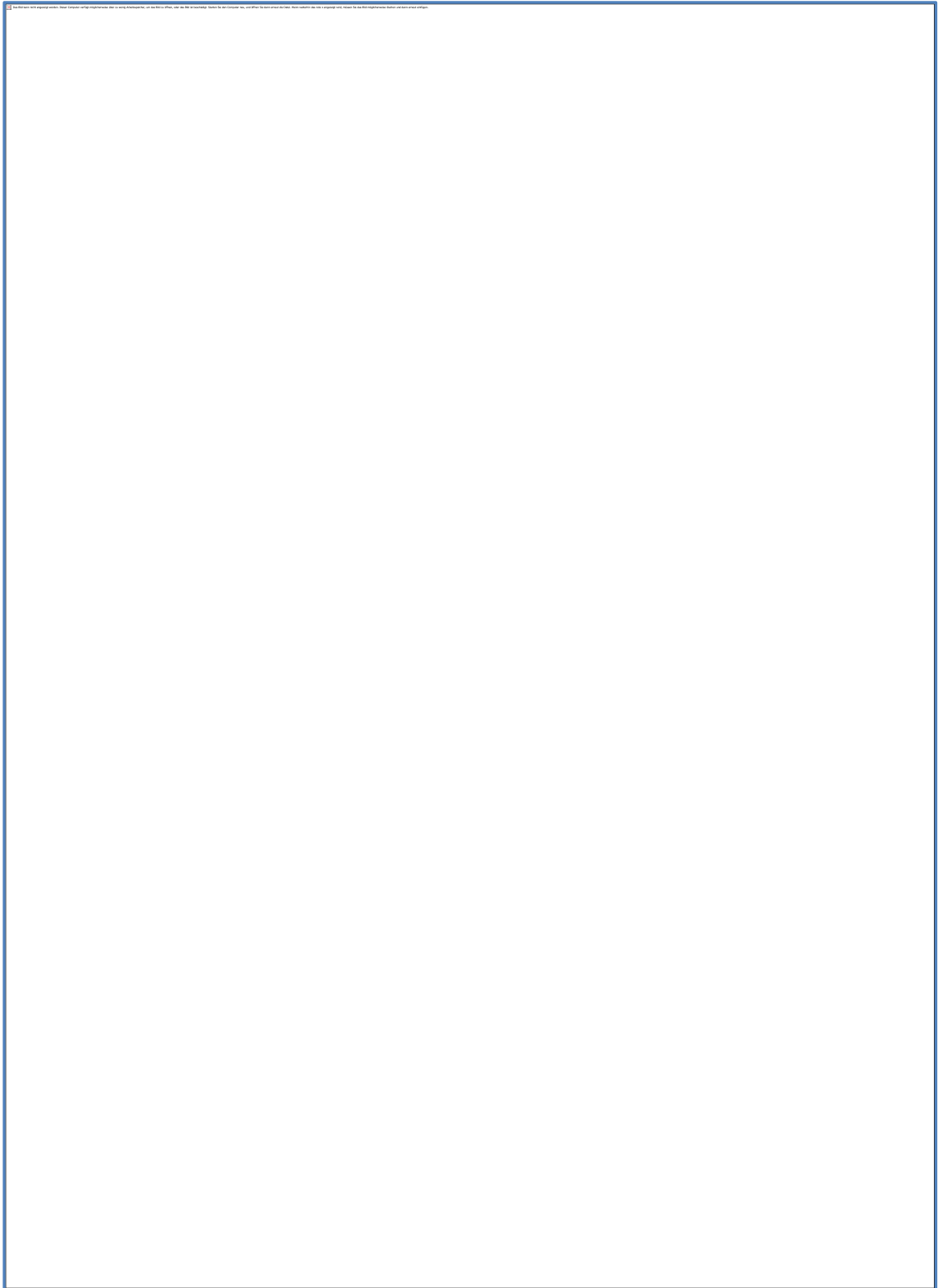


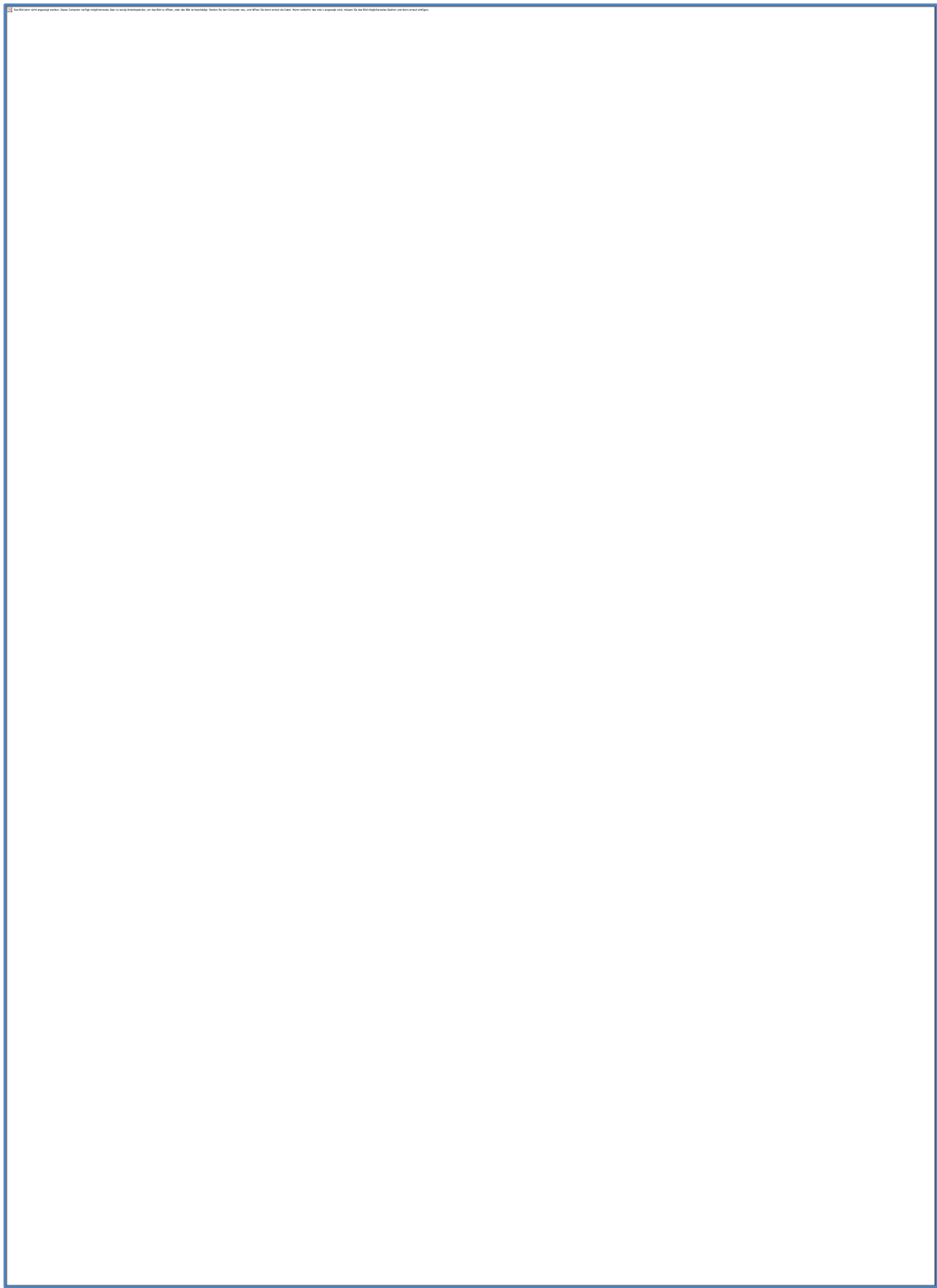


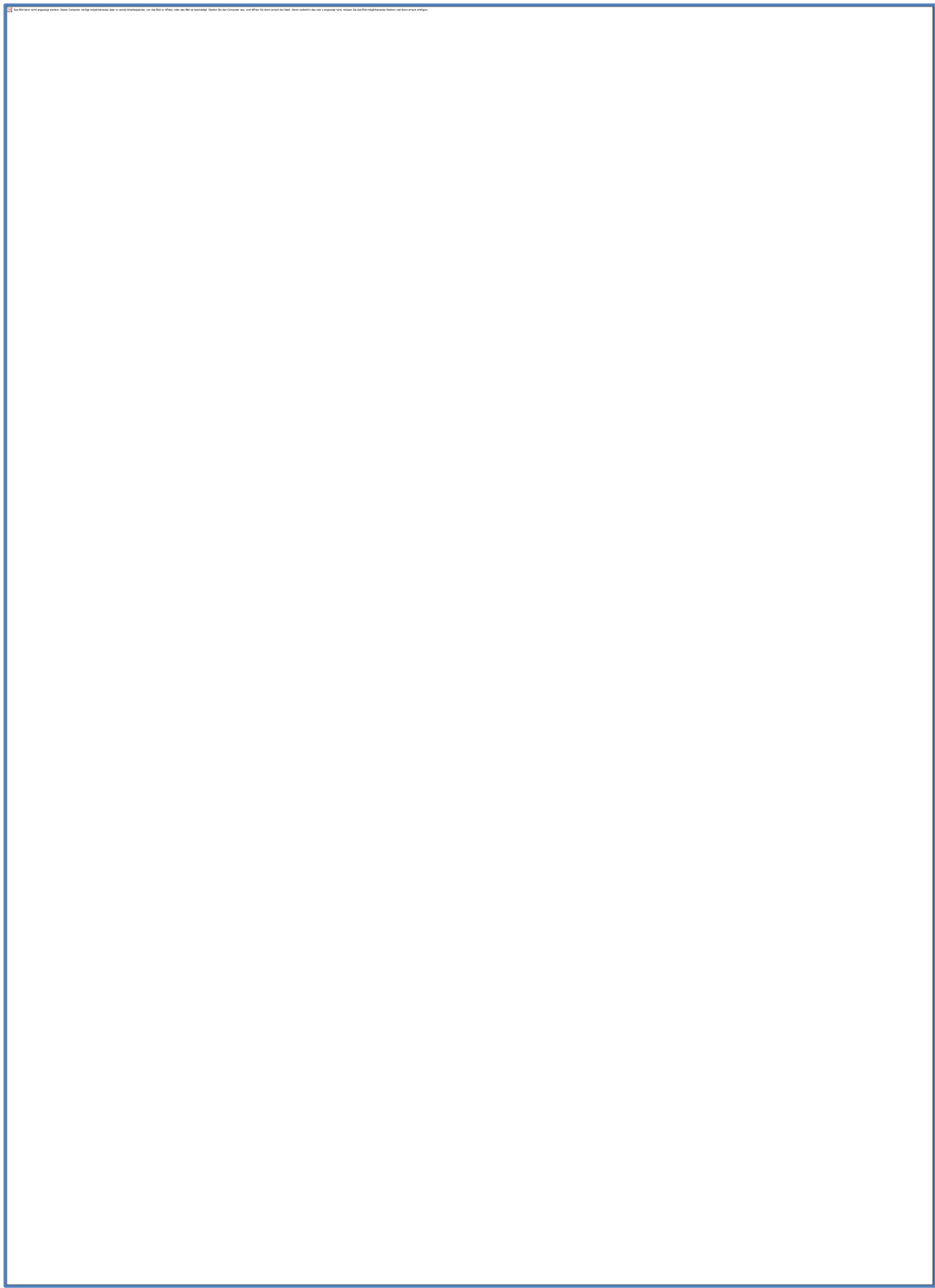


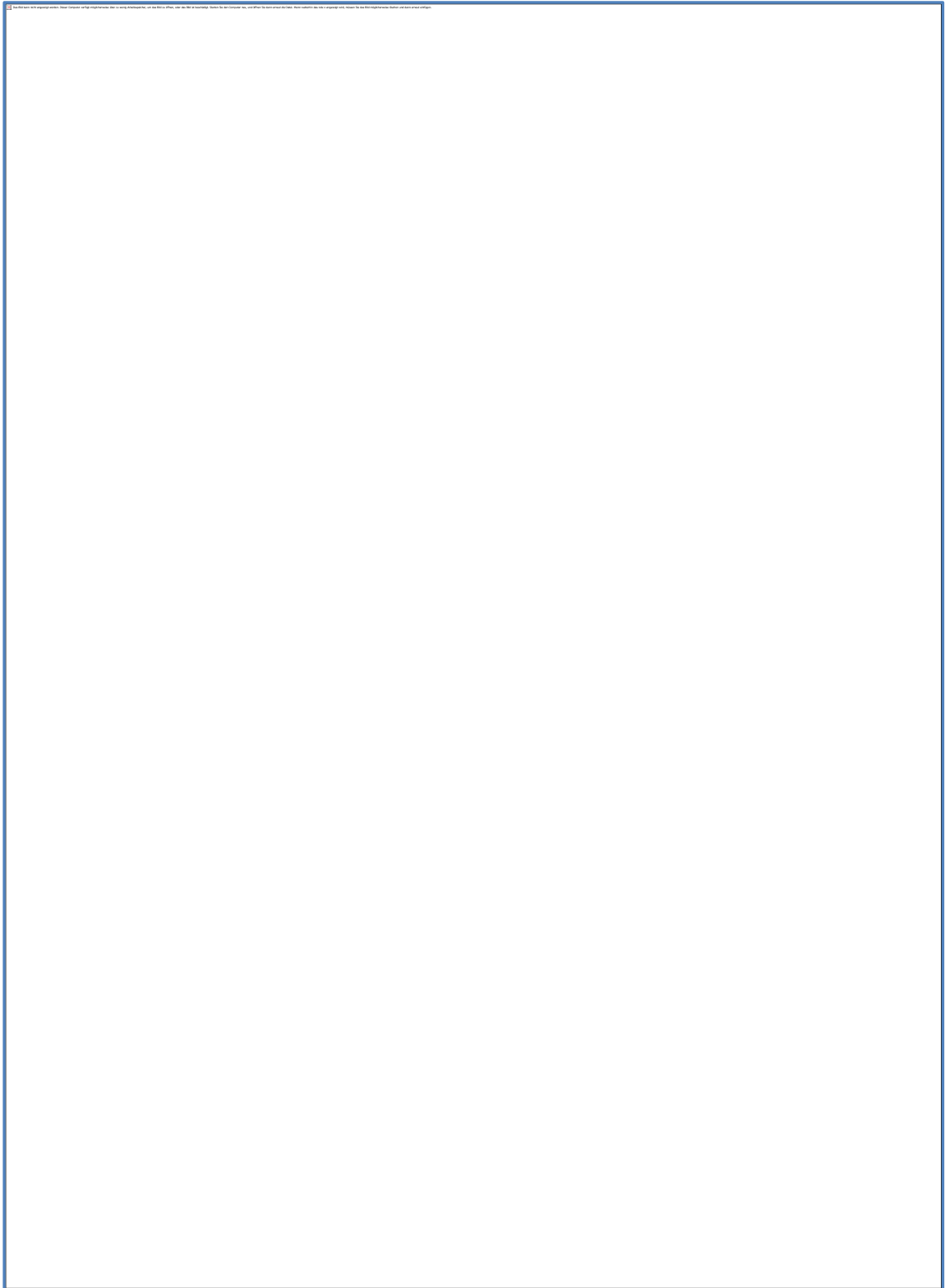


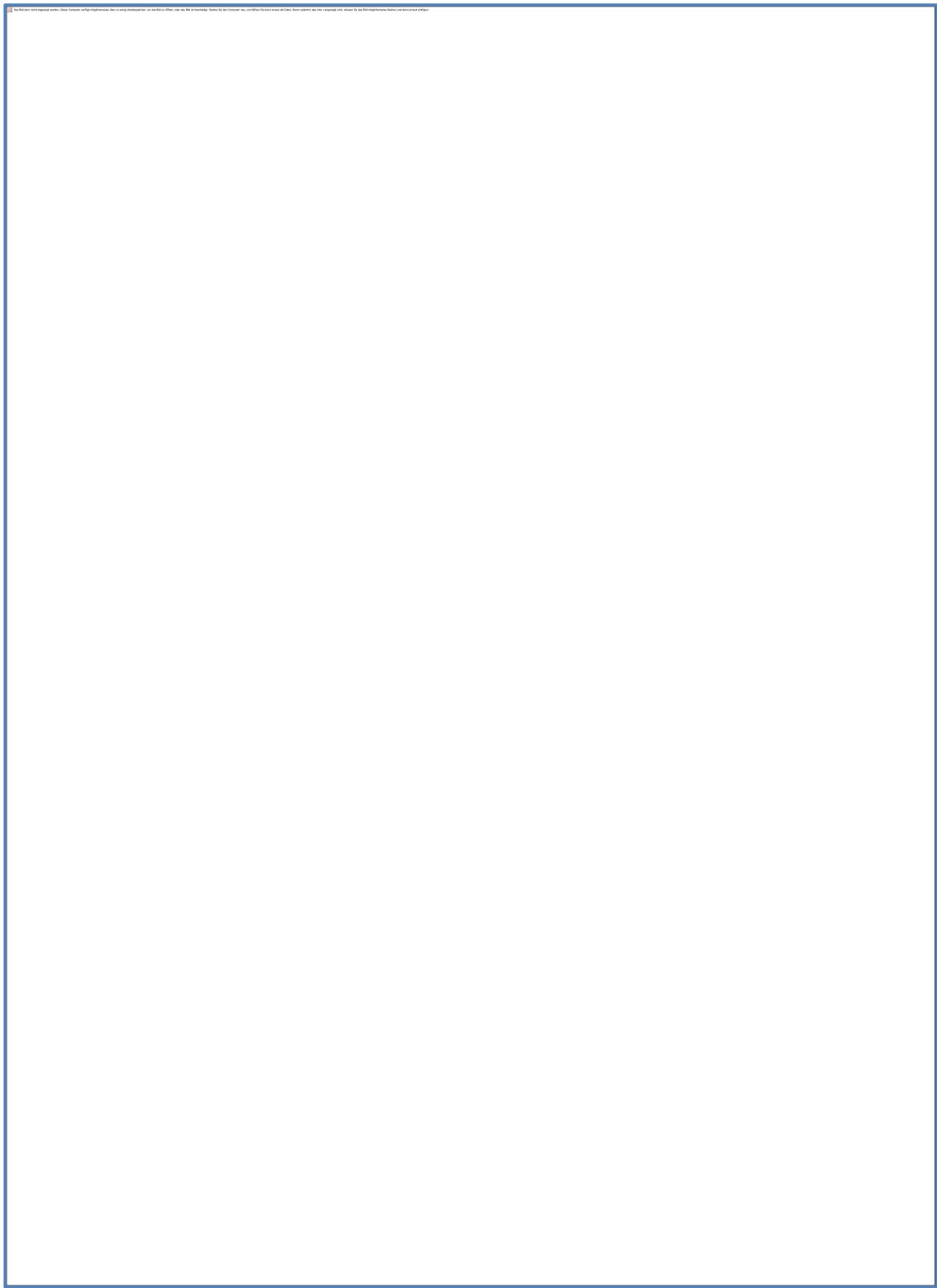


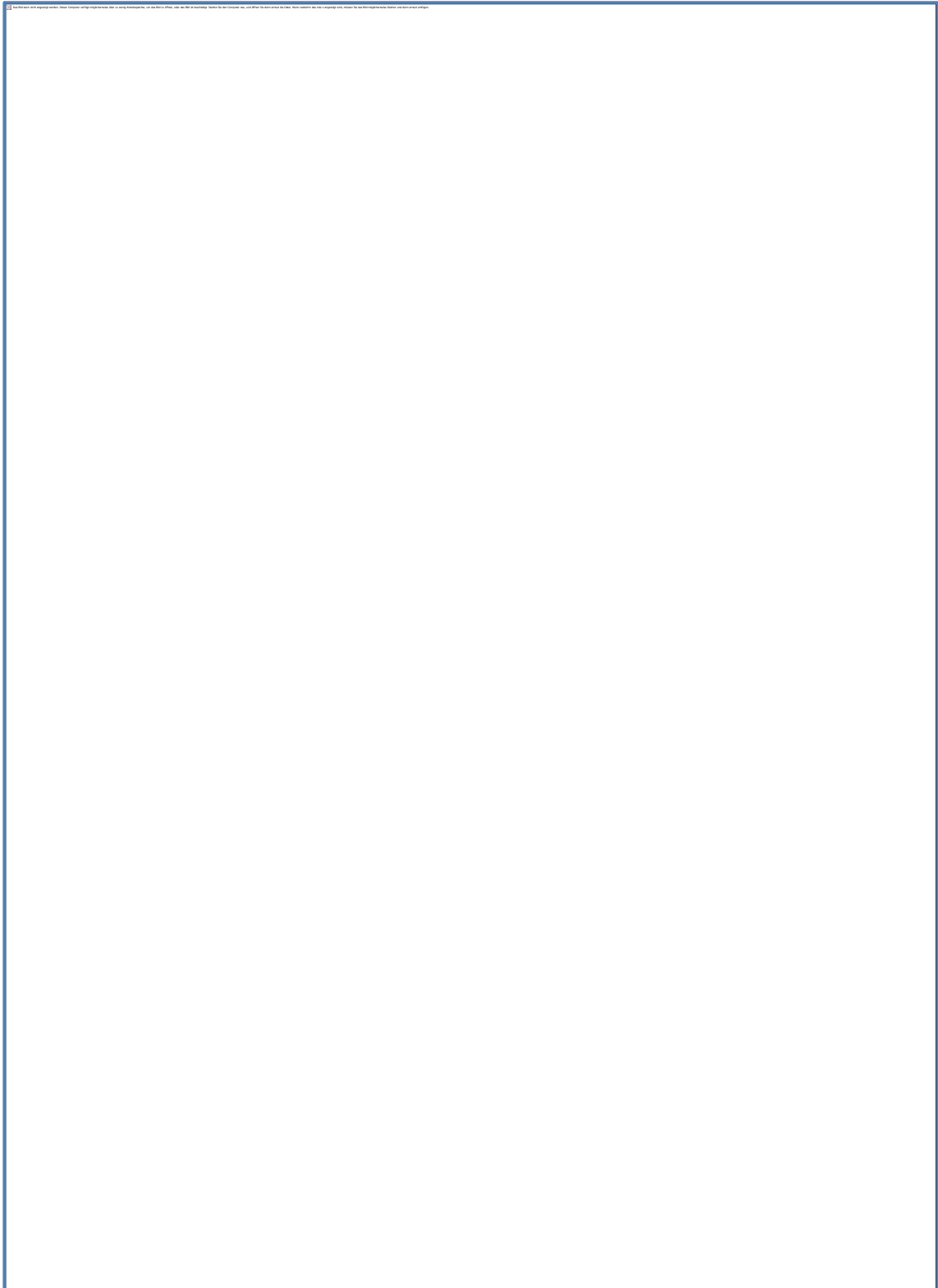


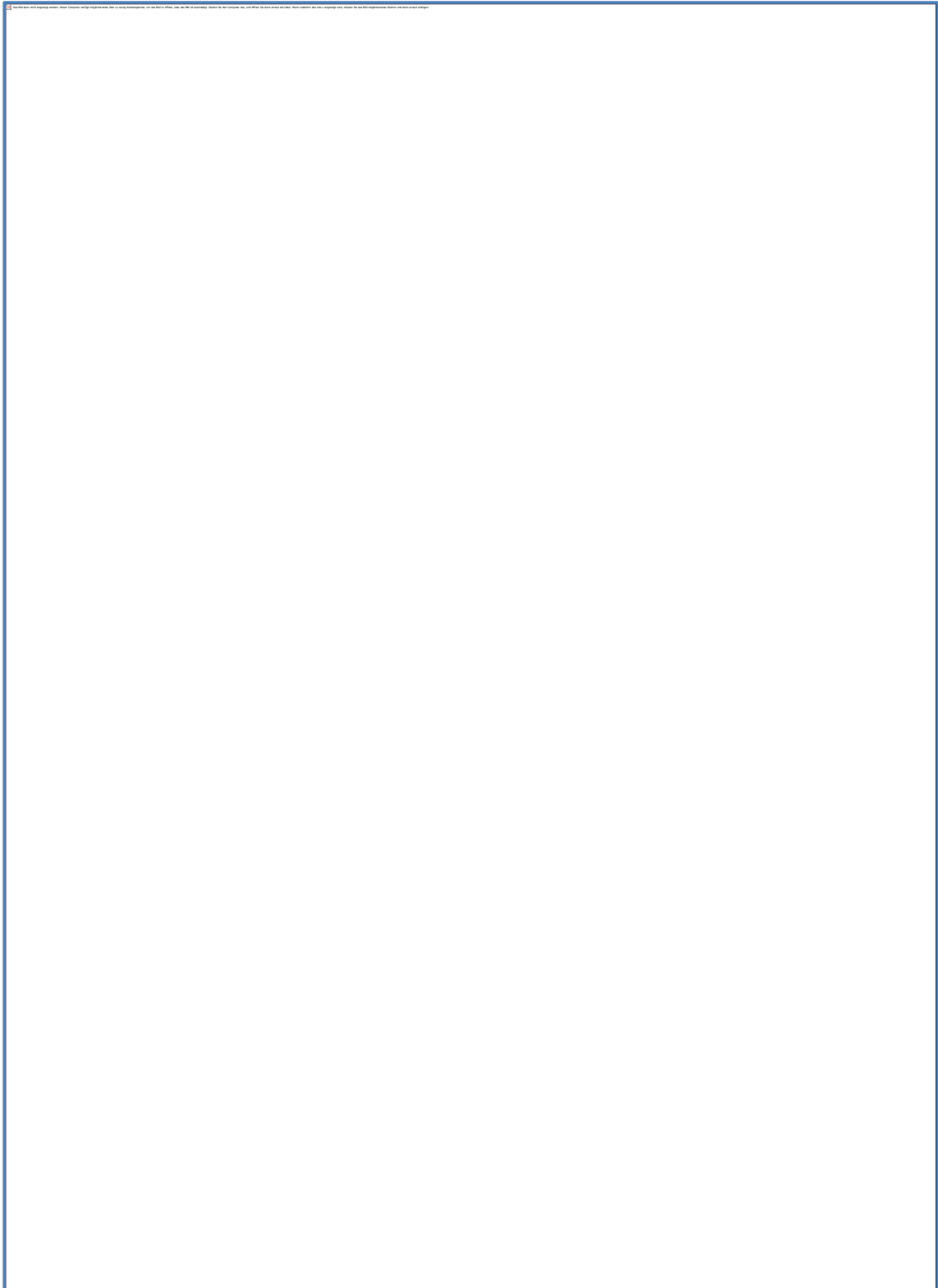


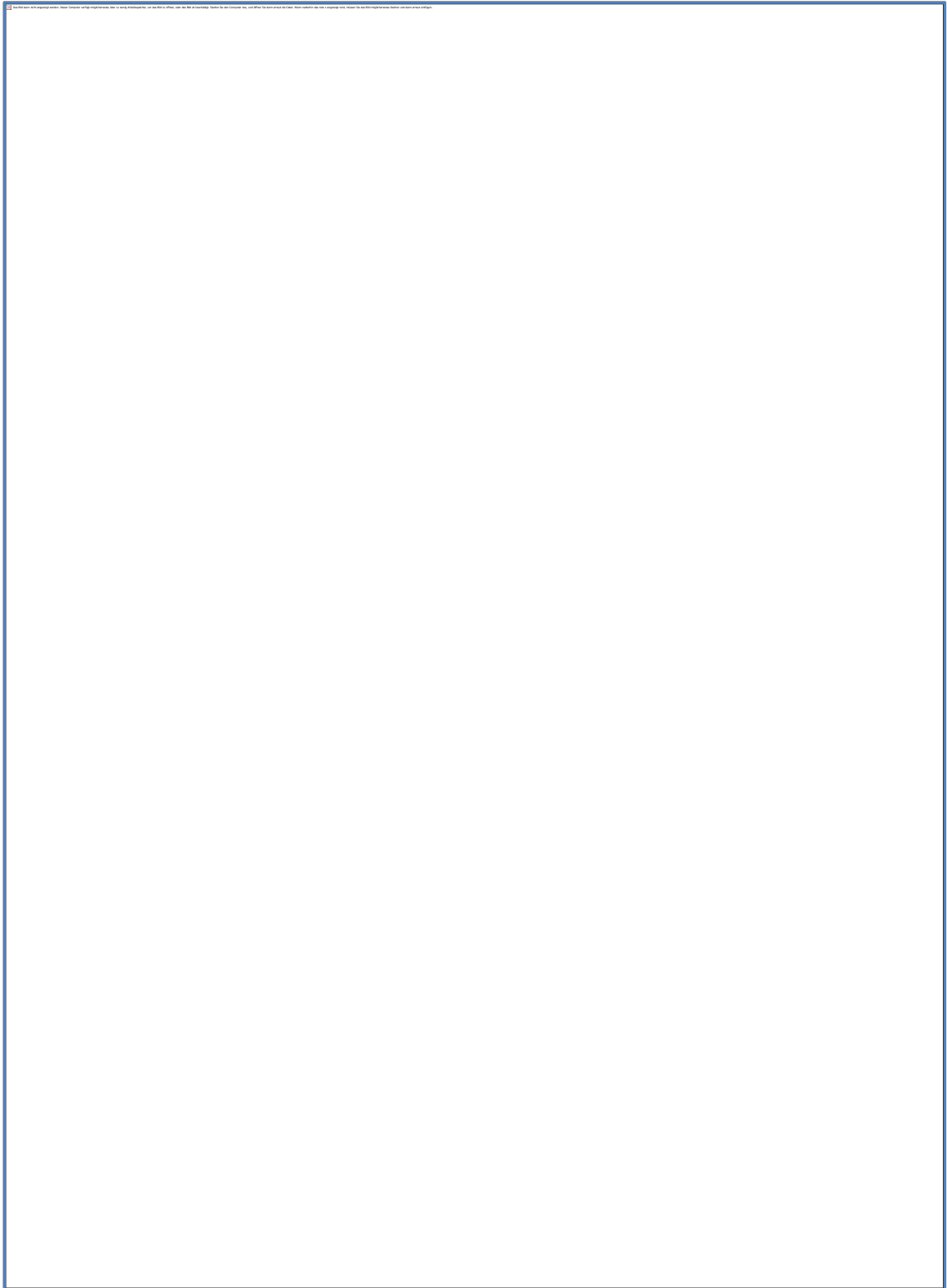


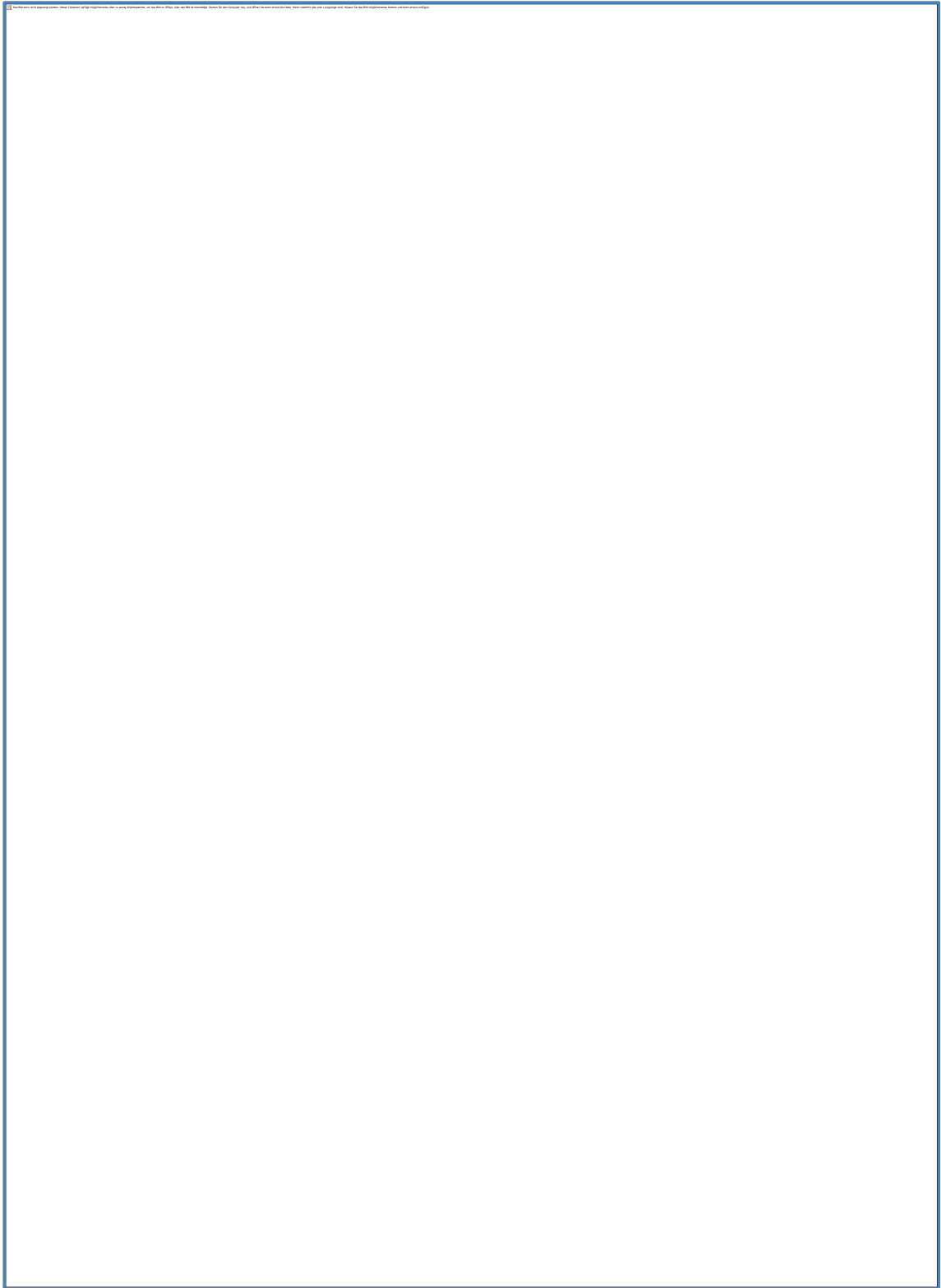


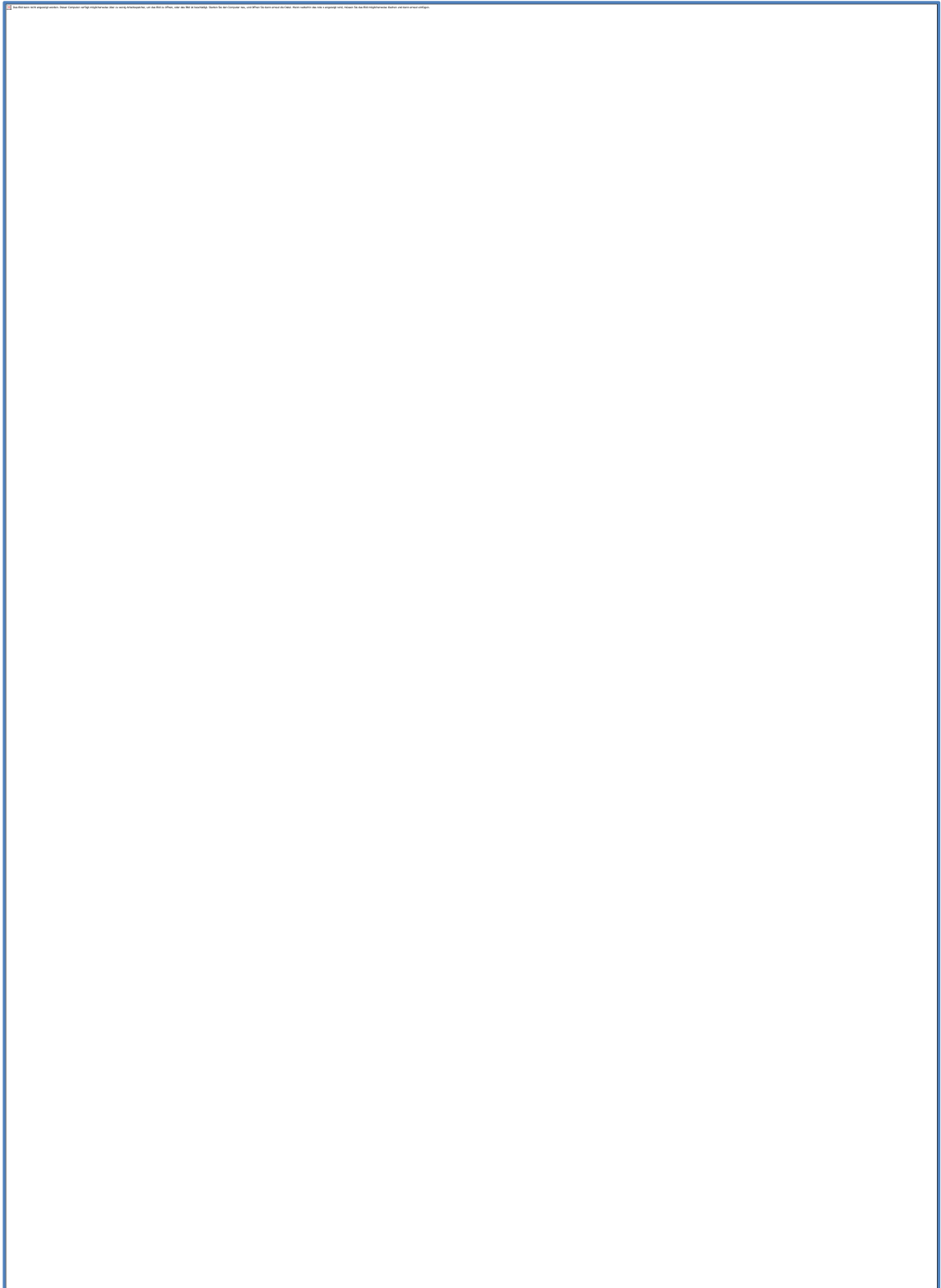


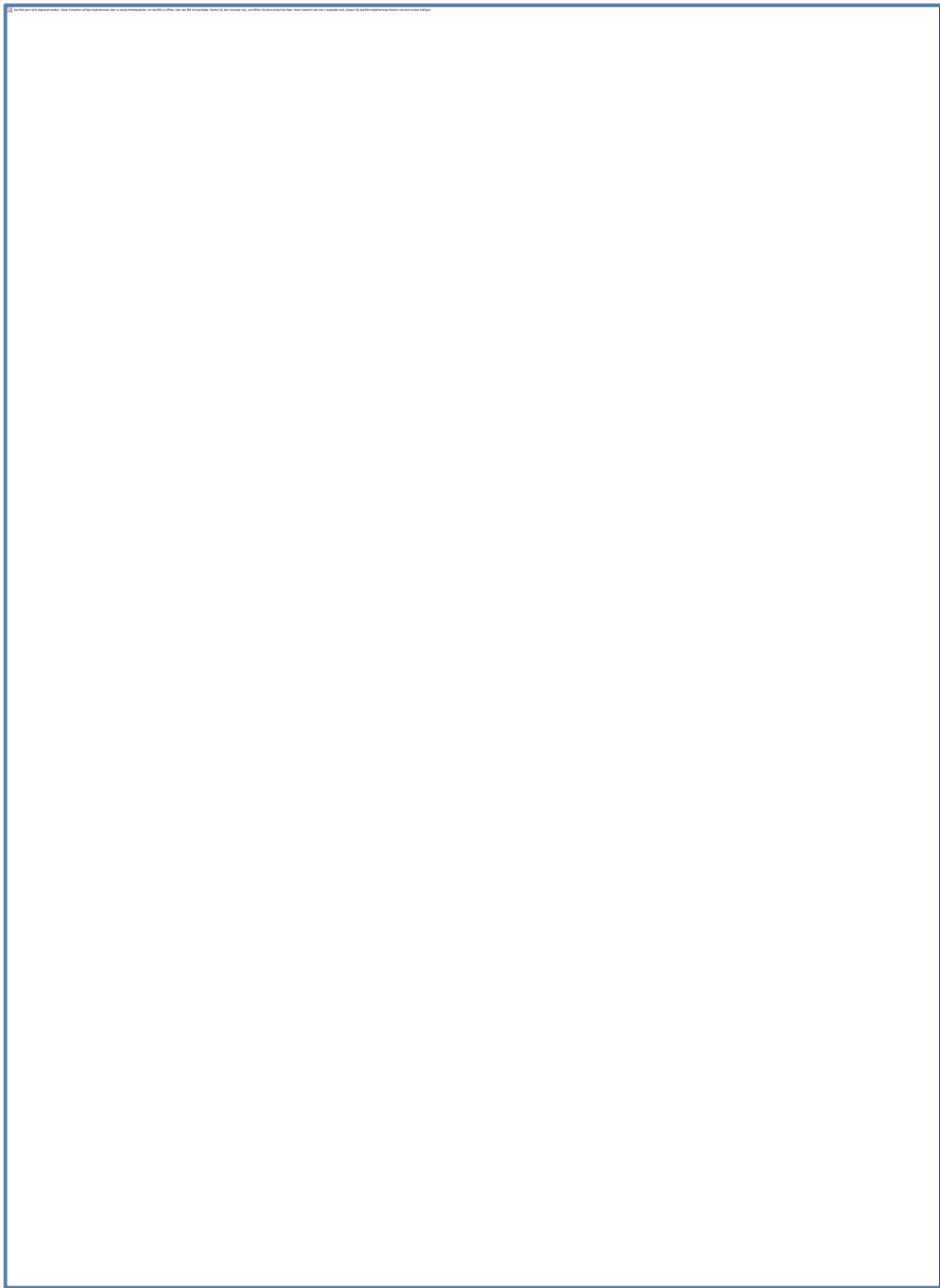


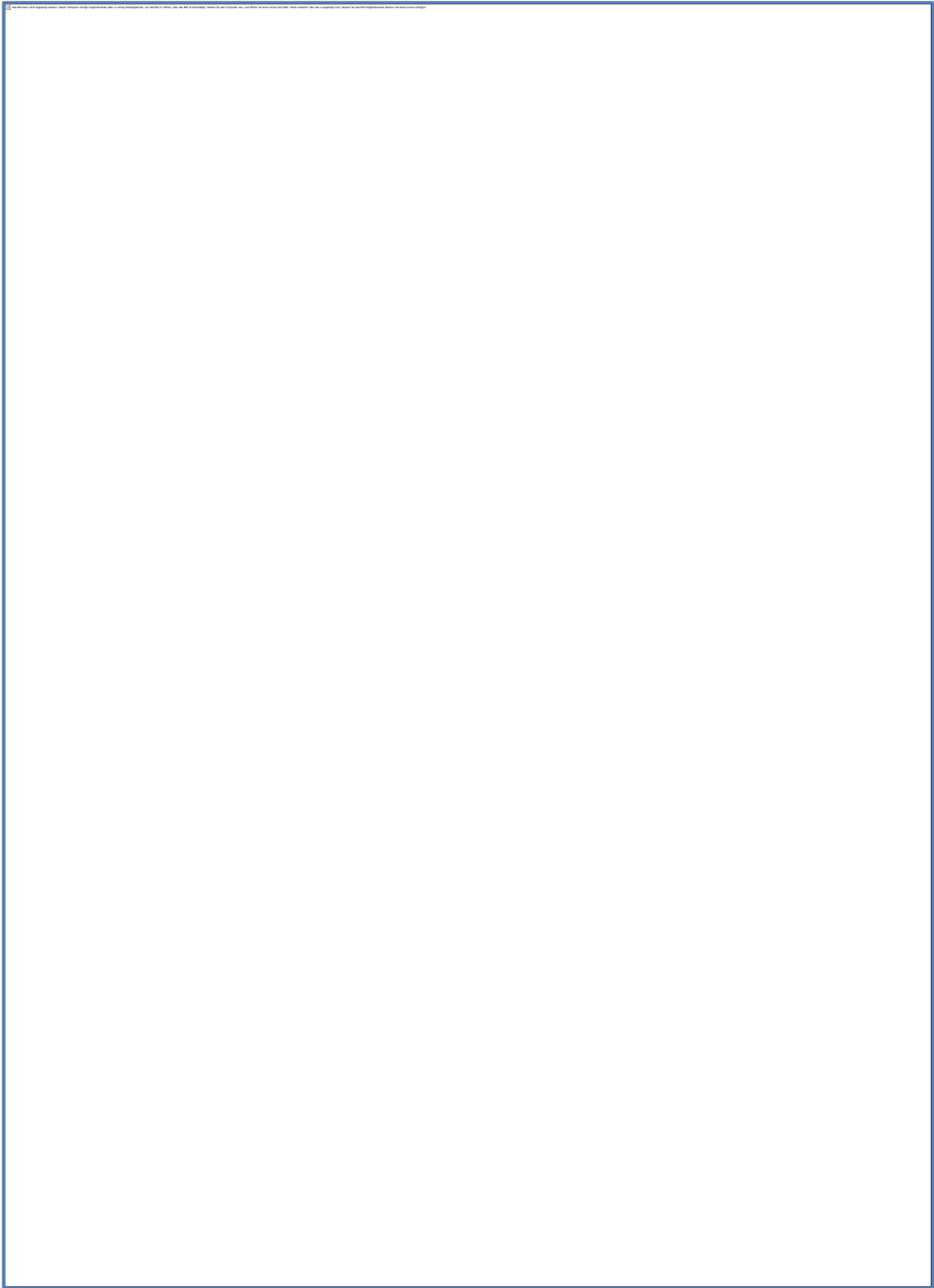


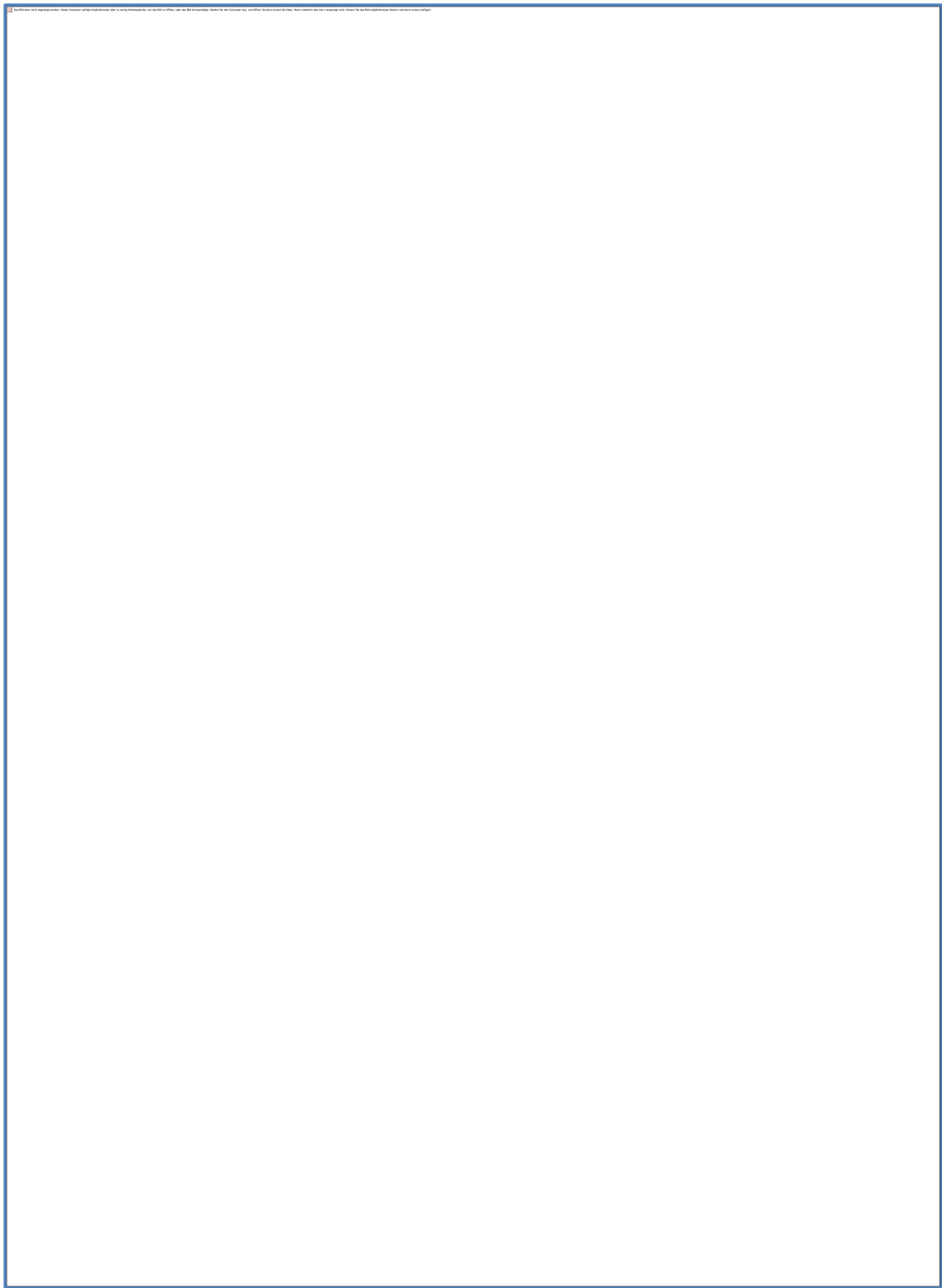


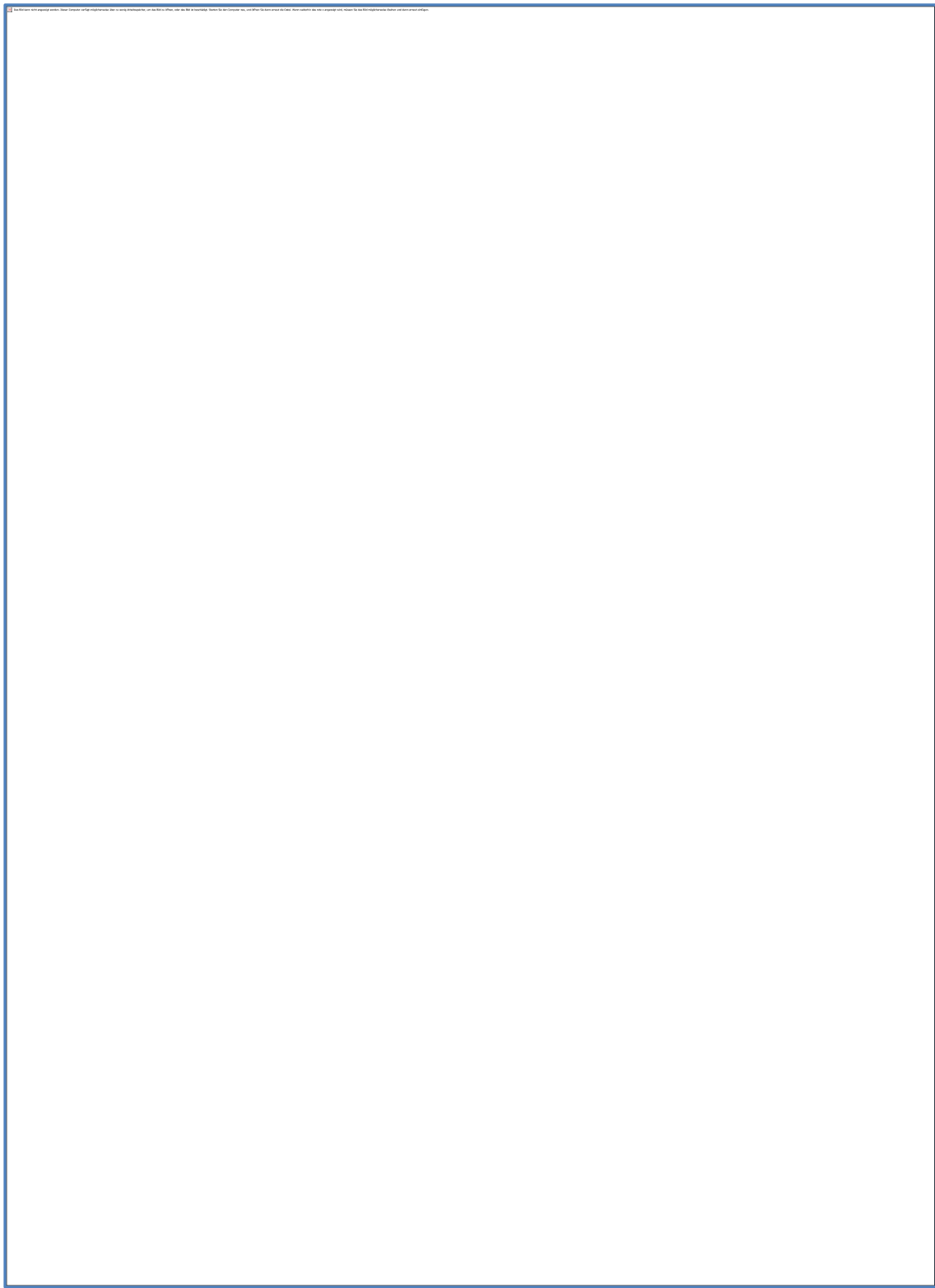


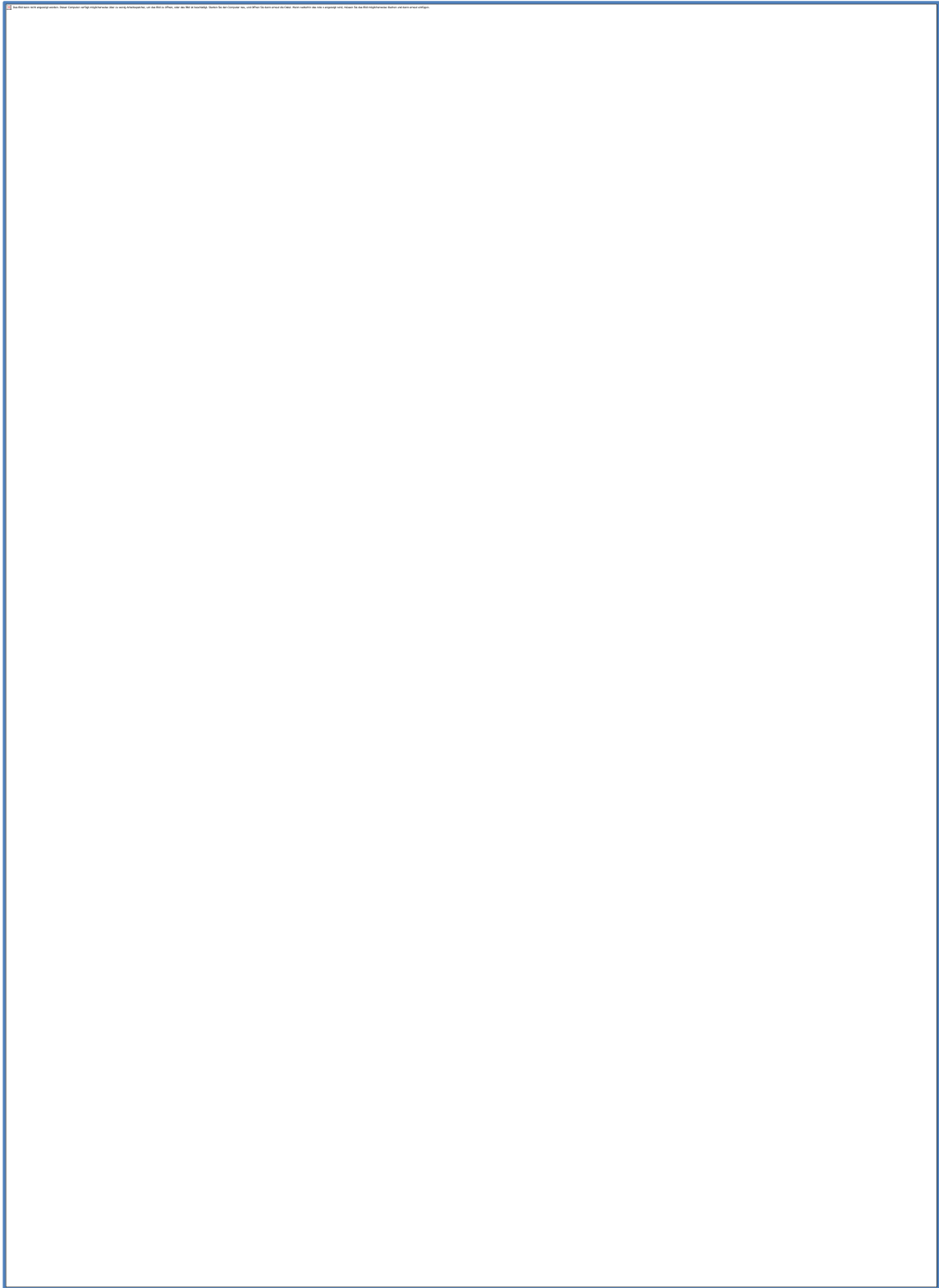


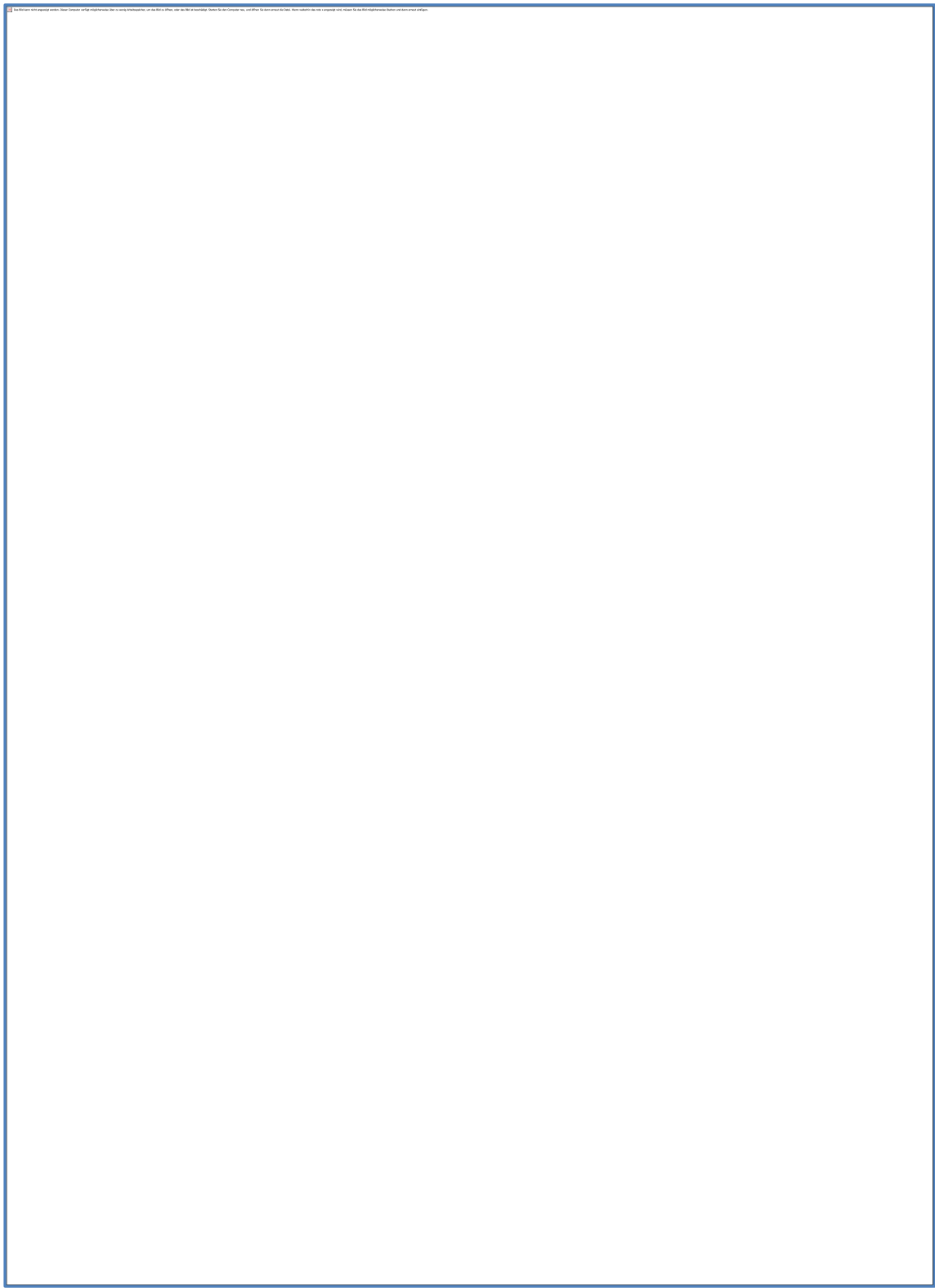


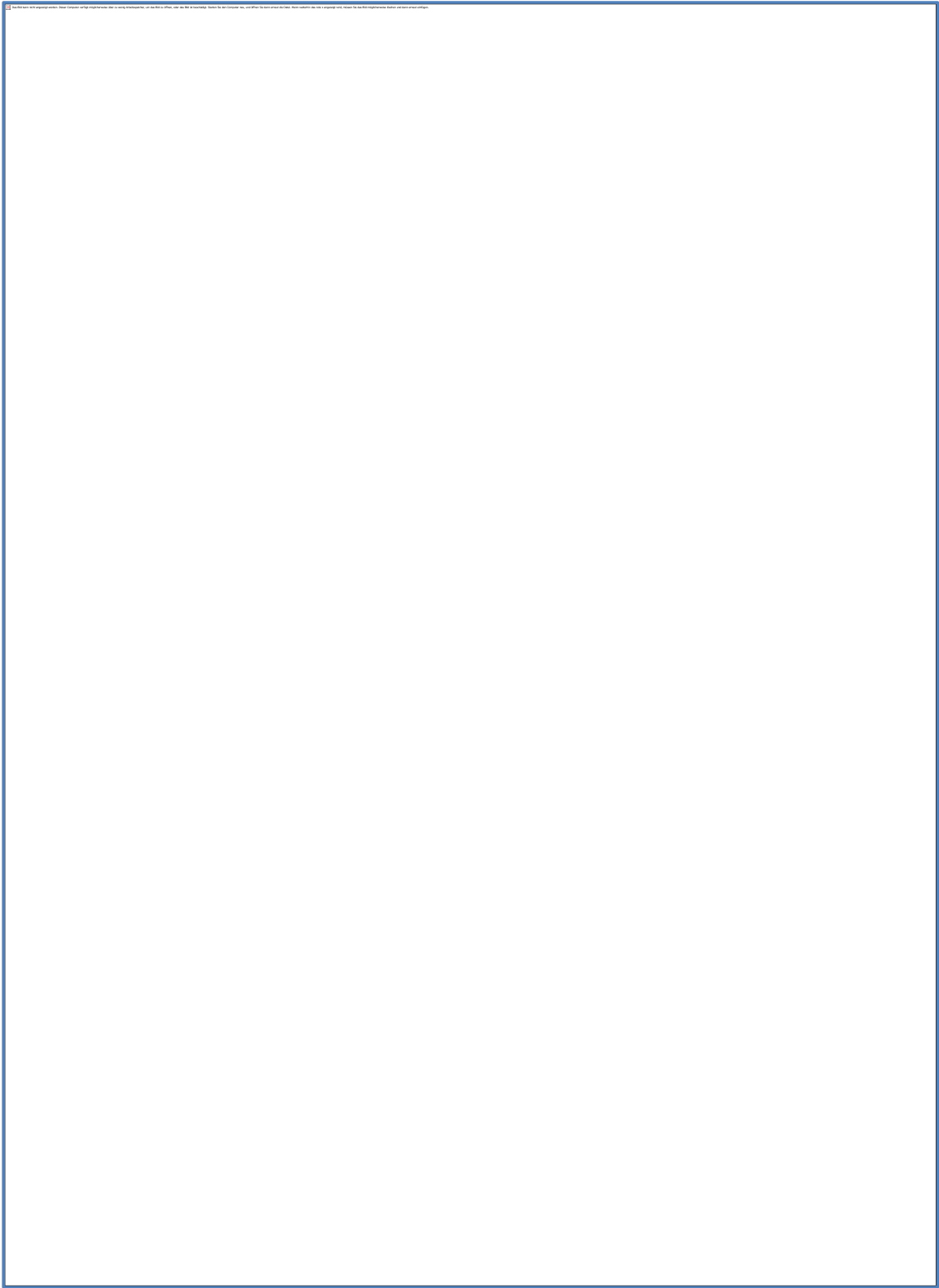


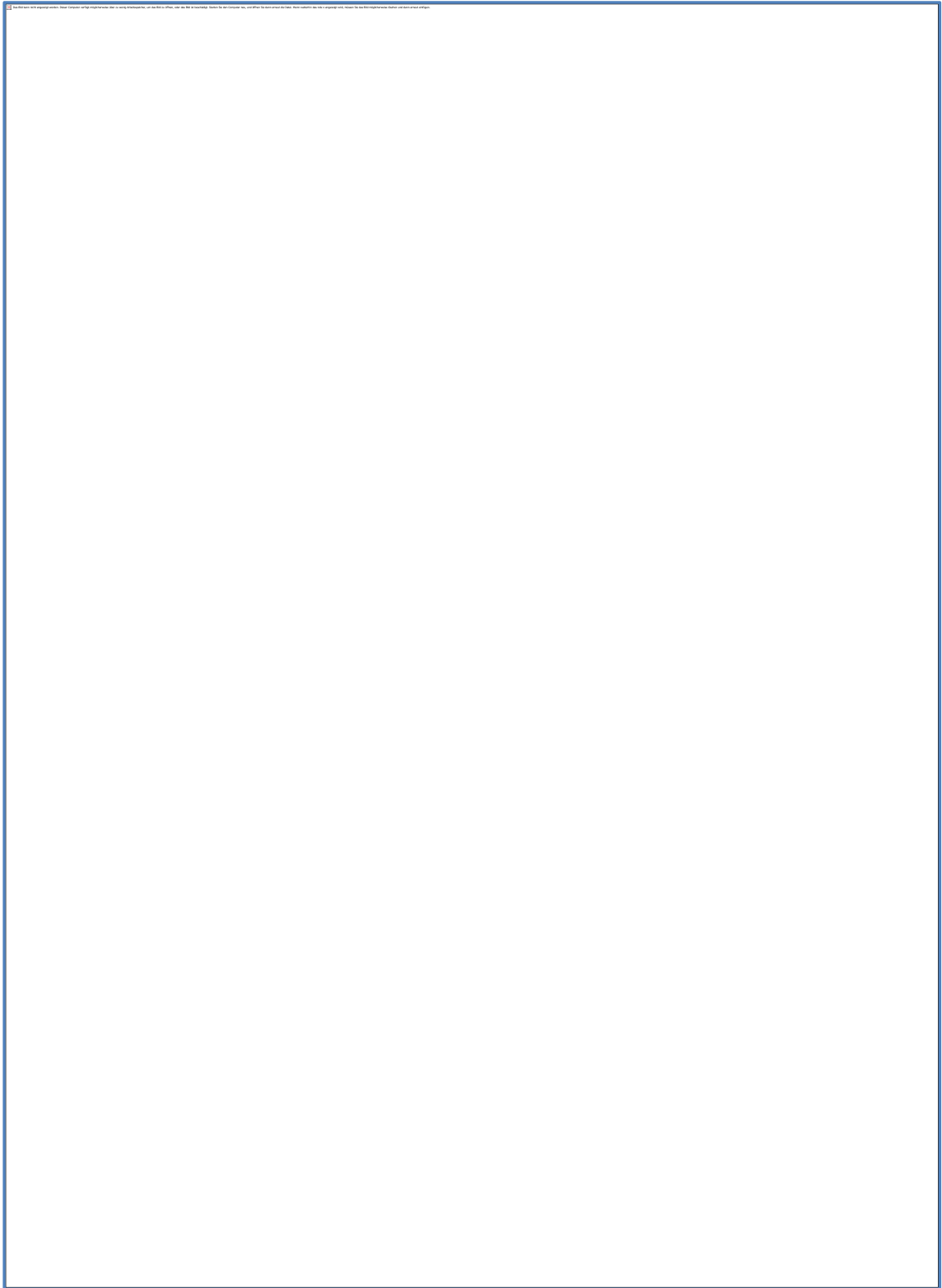


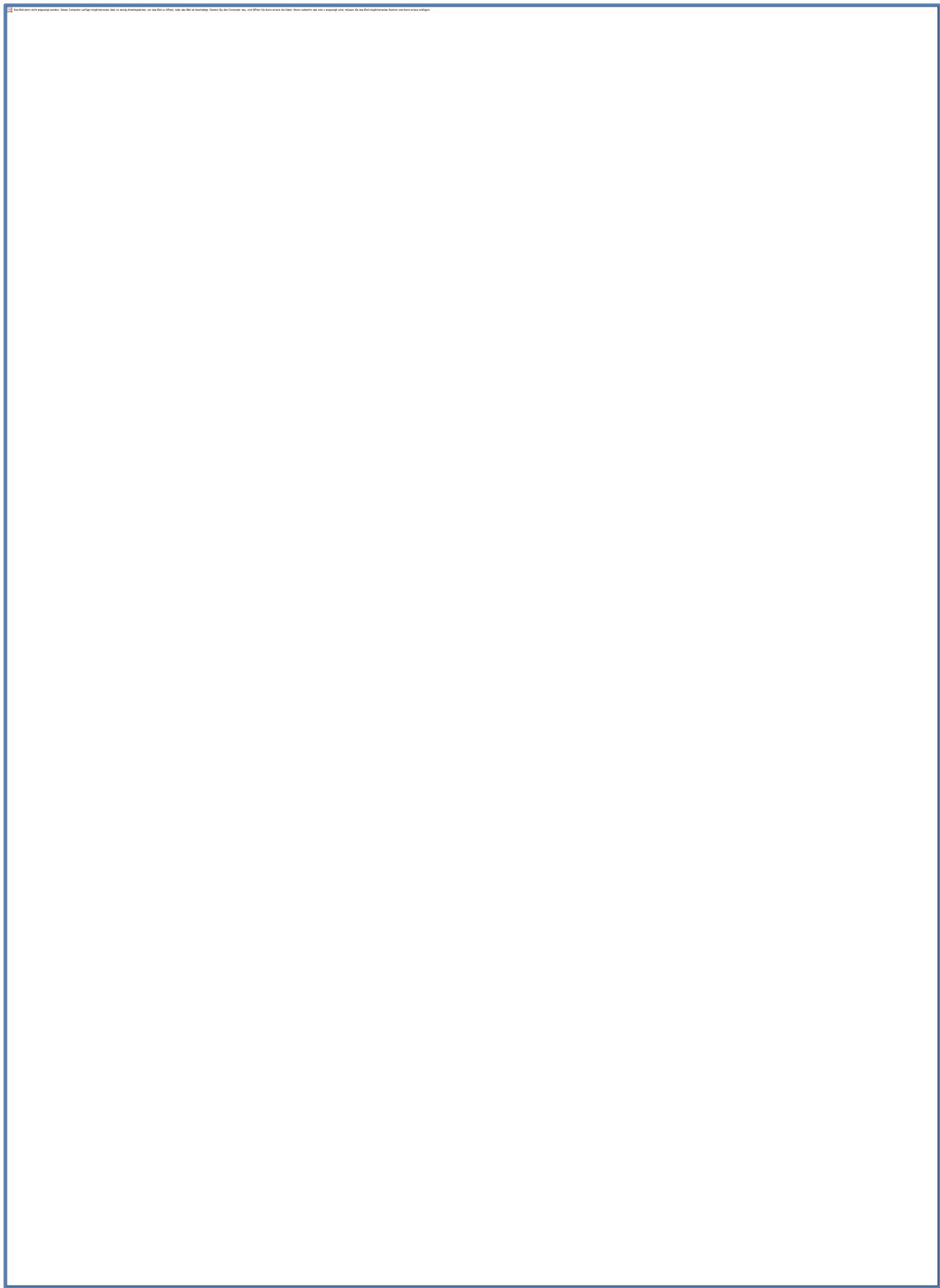


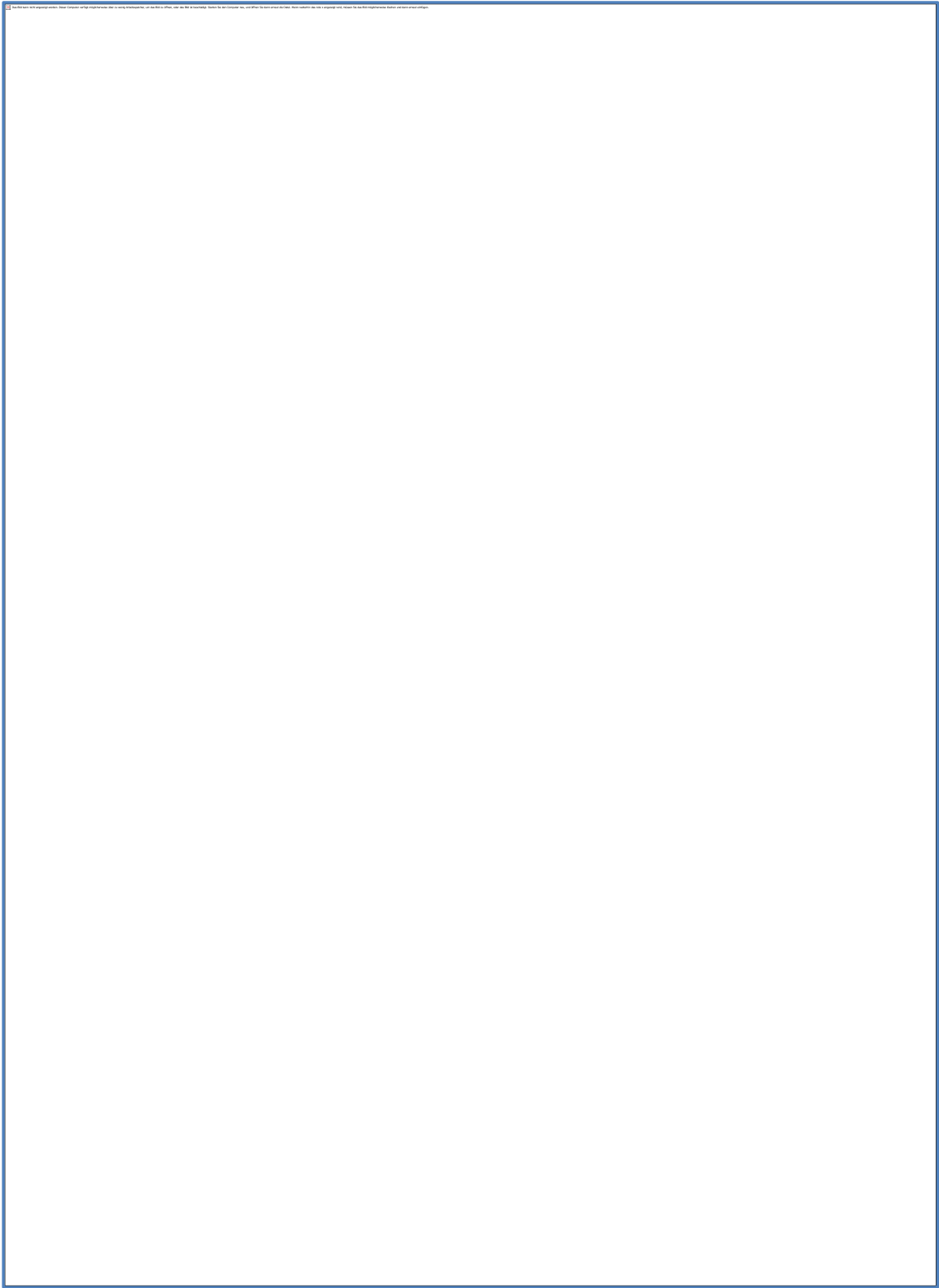


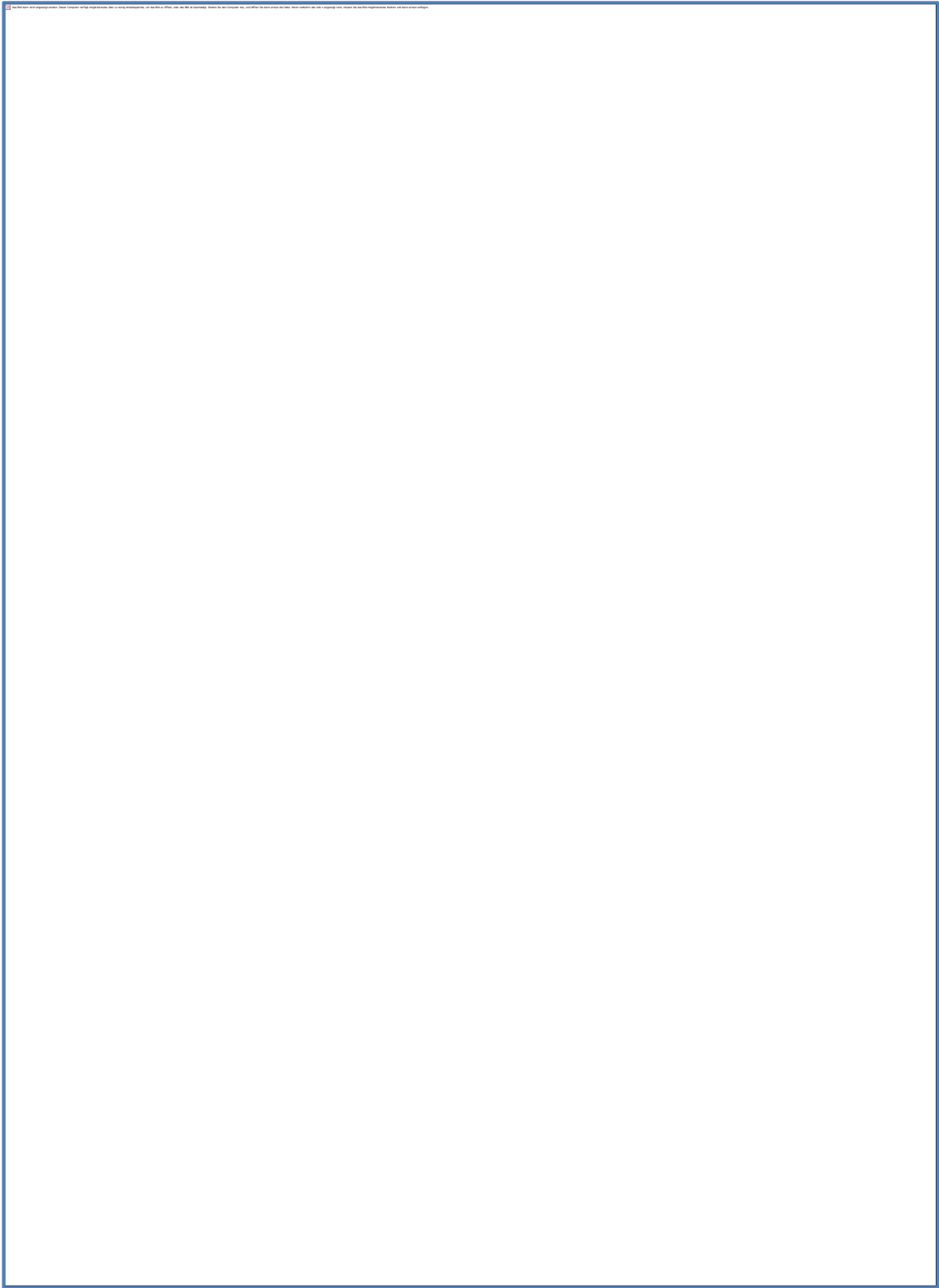












Anhang F. Auflistung der Versuchsergebnisse

Großversuche, K.Kudla	S355 180x15mm/190x15mm	Anriss erkennbar, Bauteilversuche
$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	m	R
64,97	3	0,1
60,48	2,84	0,1
Großversuche, K.Kudla	S355 180x15mm/190x15mm	50% des Querschnittes geschwächt, Bauteilversuche
$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	m	R
64,03	3	0,1
69,52	3,22	0,1
LBF 3205, Olivier	St52-3 2x31,5x40	Bauteilversuche
$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	m	R
156,1	3	-1
120,8	2,49	-1
85,8	3	0
LBF 3205, Berger	St37-2 2x10mm	Bauteilversuche
$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	m	R
122,3	3	0,1
80,3	1,35	0,1
LBF 3205, Berger	St52-3 2x10mm	Bauteilversuche
$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	m	R
98,4	3	0,1
114,1	3,75	0,1

LBF 3205, Berger	St52-2 2x25mm	Bauteilversuche
$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	m	R
100,3	3	0,1
96,5	2,85	0,1
LBF 3205, Berger	Kt52-2 2x25mm	Bauteilversuche
$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	m	R
64,1	3	0,1
90,7	4,19	0,1
LBF 3205, Berger	St37-2 2x25mm	Bauteilversuche
$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	m	R
114,1	3	0,1
123,8	3,55	0,1
BAM, Bericht 164	25 + 35mm	Trägerversuche
$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	m	R
85,2	3	0,1
36,1	1,45	0,1

I

LBF 4879	St 37-2 3x50mm	Kleinversuche
$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	m	R
79,6	3	-1
125,9	4,57	-1
87,6	3	0
120,5	4,85	0

LBF 4879	St 37-2 30 + 40 + 30mm	Kleinversuche
$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	m	R
85,7	3	0
104,8	3,61	0
88,0	3	-1
104,8	3,61	-1

II

**Anhang G. Gutachterliche Stellungnahme der RWTH Aachen
zur Kerbfalleinteilung und Prüfbarkeit von Lamellen-
stößen**

**Der Inhalt des Anhanges G ist nicht für die Öffentlichkeit
freigegeben und wurde durch Max Bögl Stahl- und Anlagenbau
GmbH & Co. KG gesperrt.**

Anhang H. Einfluss einzelner Aspekte auf Lebensdauer der Stahlbrückenkonstruktionen

Einfluss einzelner Aspekte auf Lebensdauer der Stahlbrückenkonstruktion

Veröffentlicht: 27.03.2009, Aktualisiert: 31.03.2009 11:18

Rubrik: [Brücken](#)

Im Artikel sind Ergebnisse der Forschungs- und Grantprojekte des Verkehrsministeriums der CR präsentiert: 1F82C/012/910 Die Bewertung der Restlebensdauer der Hauptstahlkomponenten der Brückenkonstruktionen aus wetterfesten Baustählen sowie des Forschungsprojektes CG911-050-910 Die Analyse der Methodik von Fehlern der Festigkeitsschweißnähte der Lamellengurte von Stahlbrückenkonstruktionen und Erfahrungen aus der Praxis, Durchführung von Werkstatt-, Montage- und Hauptuntersuchung des Zustandes von Straßenbrücken und Bahnbauten. Der Verfasser war im Lauf der Jahre Brückenhersteller, -besteller und -verwalter.

- [Foto](#)



EINLEITUNG IN DIE PROBLEMATIK

Bei der Durchführung der Abnahmen von Stahlbrückenkonstruktionen können im Laufe der Jahre grundlegende kritische Stellen der Stahlbrückenkonstruktion genannt werden, die einen grundsätzlichen Einfluss auf ihre Lebensdauer haben. Es verlangt die Kenntnis des Zustandes von Stahlkonstruktionen, die in Brückenobjekten eingebaut sind.

Diese Kenntnisse können aber nicht durch eine zufällige Ausfahrt zum ausgewählten Brückenobjekt gewonnen werden, sondern durch die Überwachung des Verhaltens von Stahlkonstruktionen während vieler Jahrzehnte, am besten vom Stadium der Herstellung, über Montage und Instandhaltung. Zur Beurteilung von Konstruktionen wird auch spezielle Qualifikation erfordert, ich meine die Fälle, wenn zum Beispiel der Zustand von Schweißverbindungen nach 30 Jahren von der Person ohne entsprechende Fachqualifikation beurteilt wird. Die Schweißnaht kann durch diese

Person als schweißgerecht bewertet werden, aber meistens ist das Gegenteil wahr. Gleiche Fälle der Bewertung beziehen sich auf Fehler des Stahlmaterials nach Jahren, Fehler der Schraubverbindungen usw. Ich erlaube mir vor der Beurteilung von Konstruktionen durch unqualifizierte Personen zu warnen, weil die Ergebnisse der Gutachten nicht objektiv und qualifiziert sind und anhand ihrer Schlussfolgerungen können die Fehler nicht analysiert werden. Die einzige Vorschrift in der Tschechischen Republik, in der die Anforderung an die Qualifikation dieser Mitarbeiter angeführt ist, sind Technische Qualitätsbedingen des Verkehrsministeriums TKP Kapitel 19 Stahlbrücken und -konstruktionen vom Jahre 2008 [1].

Es ist auch eine der grundsätzlichen Bemerkungen, die in Couloirs zu diesem Thema diskutiert werden, wobei dem Verkehrsministerium vorgeschriebene Qualifikation der Personen vorgeworfen wird. Die Gründe dafür, warum die Qualifikation von Personen nötig ist, sind in folgenden Artikeln, einschließlich Beispiele, was die Unqualifiziertheit verursachen kann, angeführt. In weiteren Textteilen sind kritische Stellen von Brückenkonstruktionen benannt, die im Falle der falschen Durchführung einen grundsätzlichen Einfluss auf die Lebensdauer von Brücken haben können.

GRUNDVERTEILUNG VON KRITISCHEN STELLEN DER KONSTRUKTIONEN

Zum Auftreten von kritischen Stellen der Stahlkonstruktionen tragen meiner Meinung nach im bedeutendsten Maße folgende Faktoren bei: Mängel in der Legislative, fehlende Zukunftsvision (wissen wir, was wir wollen?), direkte Vernachlässigung von Tätigkeiten des Bestellers und Herstellers, Probleme des Entwurfs, Herstellung, Montage, Verwaltung und Instandhaltung von Konstruktionen.

Grundeinflüsse auf Qualität der Stahlkonstruktionen :

- Einfluss der Konzeption des Staates in der Stahlanwendung und Vision der Zukunftsanforderungen,
- Verwaltung und Instandhaltung von Konstruktionen,
- Aufbau von neuen Objekten, Einfluss des Bestellers im Rahmen der Abnahmen von Konstruktionen,
- Einfluss des Bauherstellers.

Aber dies ist nur ein globaler Blick an die Problematik. Um diese Problematik zu verstehen, müssen wir viel tiefer eindringen.

Mit tieferer Eindringung meine ich eine detaillierte Aufdeckung von einzelnen Einflussaspekten, denen wir bei der Herstellung, Montage und Instandhaltung von Konstruktionen begegnen (Bild 1). Im weiteren Text werden nur einige Fälle erläutert.

Stahlmaterial, Fehler bei der Wahl des Stahlentwurfs und Qualitätsfehler.

Die Wahl des Stahlmaterials und Typ der Konstruktion bedingen ihre Lebensdauer. Die Gestalt der Konstruktion, ihr Charakter, Beanspruchungsart und Wartetechnik müssen gründlich schon in der Phase des Entwurfs der Konstruktion beurteilt werden und hängen direkt mit der Güte und der gewählten Stahlsorte zusammen. In letzter Zeit verbreitete sich sehr die Anwendung von wetterfesten Stählen für Brückenkonstruktionen, vor allen Autobahnbrücken D47, D8 (wetterfester Stahl gemäß ČSN EN 10025-5, merken Sie sich den Begriff atmosphärische Korrosion und auch Standardbezeichnung) [1].

Der Verfasser dieses Beitrags befasst sich mehr als 20 Jahre mit dem Verhalten von Brückenkonstruktionen, die aus wetterfestem Stahl ATMOFIX hergestellt werden, in letzten fünf Jahren als Auftragnehmer für Grantprojekt der Forschung des Verkehrsministeriums der CR 1F82C/012/910 Die Bewertung der Restlebensdauer von Hauptstahlkomponenten der Brückenkonstruktionen aus wetterfesten Baustählen. Erfahrungen und praktische Ergebnisse der realisierten Forschungen bei Brückenkonstruktionen des Alters über 30 Jahre zeigen, dass diese Stähle (ATMOFIX B) in Bezug auf Gestalt der Konstruktionen der Straßenbrücken (überragende Untergurte, Ecken, Versteifungen, fehlende Instandhaltung mangels finanzieller Mittel, Einfluss der Chloride von Streusalzen) ungeeignet sind. Die Bedingungen der richtigen Projektierung, Auswertung der Patinabildung (Schutzschichtbildung), Instandhaltung von diesen Konstruktionen, Wahl der geeigneten Stahlsorte in Bezug auf Chlorideinfluss legen die Vorschriften des Verkehrsministeriums der CR Technischen Bedingungen TP 197 Straßenbrücken und -konstruktionen aus wetterfesten Stählen [2] fest. Die Bahnbrücken werden heute aus diesem Stahl nicht hergestellt. Dies schließt jedoch die Fälle nicht aus, die im Ausland als akzeptabel angeführt werden (USA, Japan), wo seit mehr als 20 Jahren für Brückenkonstruktionen andere, geeignetere wetterfeste Stähle verwendet werden, die mit ihrer chemischen Zusammensetzung (z.B. Nickelgehalt höher als 1,5 %) den Chlorideinfluss aus der Winterwartung eliminieren helfen. Das ist jedoch nicht der Fall von Europa und des Standards EN 10025-5 [2]. Leider ist heute zur üblichen Praxis geworden, dass die Experten ohne hinreichende Fachqualifikation und Praxis im Bereich Schweißen und Hauptuntersuchungen des Zustandes von Brücken die Beurteilung von Brückenkonstruktionen, die aus wetterfesten Stählen hergestellt werden, durchführen und bestrebt sind, den Zustand von Konstruktionen, die Jahrzehnte der Wirkung des Verkehrsbetriebes ausgestellt sind, zu bagatellisieren. Es ist natürlich unterschiedlich, wenn die konkrete Konstruktion in Bezug auf Betriebssicherheit oder die Wandflächen von Hauptbalken in Bezug auf Patinaentwicklung beurteilt werden. In Bezug auf Betriebssicherheit muss sich der Beurteiler des Zustandes der Brückenkonstruktion mit der Korrosionsbeständigkeit in Stellen der Festigkeitsschweißnähte, Schraubverbindungen befassen, den Zustand von Schweißnähten im Zusammenhang mit der Ermüdung, dynamischer Beanspruchung der Konstruktion auswerten, den Stand der Instandhaltung und Reparaturart, Stahlfehler wie Verdopplungen, Schalen, Falten auswerten, den Stand der örtlichen Korrosion, galvanischen Korrosion, Spaltkorrosion, Punktkorrosion, Messerlinienkorrosion usw. auswerten, aber immer unter Berücksichtigung der Auswirkungen, die Korrosionsbeschädigung von Stahl auf die Konstruktionsstabilität hat. Ihre Auswirkungen müssen in der statischen Berechnung der Konstruktion beurteilt werden. Die Fachöffentlichkeit ist nicht objektiv über den tatsächlichen Zustand der Konstruktionen und Erfahrungen insbesondere aus der zitierten Literatur, die von Korrosionsingenieuren im Ausland herausgegeben wird, informiert [2]. Interessant ist, dass diese Gruppen von Experten vor allem das Werbematerial der Stahlhersteller und der Assoziationen der Hersteller von Stahlkonstruktionen zitieren. Es genügt aber nur eine einfache Frage, ob der Hersteller von wetterfestem Stahl dem Abnehmer Garantie der Patinabildung bietet. In diesem Augenblick erfährt der Abnehmer (in Übereinstimmung mit dem Standard EN 10025-5), dass keinesfalls. Die Garantie bezieht sich nur auf mechanische Stahleigenschaften. Die Erfahrungen aus den Inspektionen der Brückenkonstruktionen zeigen, dass

